

**EFICIENCIA ENERGÉTICA EN VEHÍCULOS LIVIANOS DEL SECTOR  
TRANSPORTE EN COLOMBIA**

JUAN CARLOS CASTILLO HERRERA I.M.

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA**

Facultad de Ingeniería Mecánica

Maestría en Ingeniería Mecánica

Grupo de Investigación en Gestión Energética - GENERGÉTICA

Pereira, diciembre 2018



**EFICIENCIA ENERGÉTICA EN VEHÍCULOS LIVIANOS DEL SECTOR  
TRANSPORTE EN COLOMBIA**

JUAN CARLOS CASTILLO HERRERA I.M.

Trabajo de Grado

Presentado como requisito para obtener el título de  
Magíster en Ingeniería Mecánica

Director:

ALVARO RESTREPO PhD.

Codirector:

LUIS FELIPE QUIRAMA M.Sc.

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA**

Facultad de Ingeniería Mecánica

Maestría en Ingeniería Mecánica

Pereira, diciembre de 2018



Nota de aceptación:

---

---

---

---

---

Director:

Álvaro Restrepo Ph.D.  
Universidad Tecnológica de Pereira

---

Yamid Alberto Carranza Ph.D.

Universidad Tecnológica de Pereira

---

Juan Carlos Serrano Ph.D.

Universidad de Pamplona



## **Dedicatoria**

*Este trabajo está dedicado a mis padres  
por ser el motor que impulsa mis metas,  
por inculcar valores en mi vida, por su  
apoyo incondicional y por sus sabios  
consejos.*





## **Agradecimientos**

*Agradezco a Dios por brindarme vida y salud para cumplir mis propósitos y por haber puesto en mi camino aquellas personas que brindaron su apoyo y confianza durante mi periodo de estudio.*

*A mis padres y hermanas que con su esfuerzo y dedicación me han enseñado a no rendirme hasta lograr las metas propuestas.*

*Al profesor Álvaro Restrepo director del trabajo, por el tiempo dedicado, su asesoría y confianza.*

*Al Decano Juan Esteban Tibaquirá, por brindarme su apoyo y confianza en el desarrollo del trabajo y en general.*

*Al personal del Laboratorio de Pruebas Dinámicas Automotrices, que me brindaron su amistad y apoyo incondicional.*

*Al Grupo de Investigación en Gestión Energética – GENERGÉTICA, por abrir sus puertas y brindar confianza, experiencia profesional, compañerismo y enseñar el valor de la disciplina.*

*A la Facultad de Ingeniería Mecánica, por brindarme una beca del 50% para desarrollar el estudio de la maestría.*

*A la Universidad Tecnológica de Pereira y a la Vicerectoría de Investigaciones, por vincular el trabajo en las convocatorias internas y brindar su apoyo financiero.*

*A toda mi familia, por su apoyo incondicional y por enseñarme que cada momento de la vida merece una sonrisa.*

*Por último, a todos mis seres queridos por su cariño, comprensión, paciencia y solidaridad.*



## **RESUMEN**

El sector transporte por carretera en Colombia es el responsable del 44% del consumo de energéticos. Igualmente, se clasifica como el principal consumidor de los combustibles derivados del petróleo y el sector productivo con mayores pérdidas de energía. En este estudio, se presentan estrategias tecnológicas y operacionales que mejoran el rendimiento de los vehículos livianos. Además, se identifican metodologías encaminadas a la medición del consumo energético y emisiones de los vehículos y se evalúa la conducción eficiente como estrategia de eficiencia energética en Colombia. Como resultado, se implementó la metodología de pruebas basada en la Regulación CFR 40 de los Estados Unidos y COPANT en un laboratorio del país y se evaluó mediante el aseguramiento metrológico el consumo de combustible en un vehículo liviano de combustión interna. Adicionalmente, empleando conducción eficiente se identificó un aumento en el rendimiento del 15% y 20% en pruebas de laboratorio y ruta respectivamente.



## **ABSTRACT**

In Colombia, road transportation consumes 44% of the overall energy available. This sector is considered a great consumer of oil-based-fuels and the least efficient productive sector. There was identified that technological and operational strategies like eco-driving enhance the performance of vehicles. There was implemented a set of methodologies based on the measurement of energy consumption and emissions of vehicles, which theoretical and experimental models have been performed. Besides, there was conducted the evaluation of eco-driving as an energy efficiency strategy for Light Duty Vehicles in Colombia by conducting tests in a chassis dynamometer, based on the procedures described by the CFR 40 of the United States of America and COPANT. In addition, there was conducted the measuring of fuel consumption of a Light Duty Vehicle and was identified the potential of ecodriving, due to there was achieved an increase up to 20% in the energy performance of the vehicle.



## INDICE

CAPITULO I .....	1
1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. Objetivos.....	2
1.1.1. Objetivo general.....	2
1.1.2. Objetivos específicos.....	2
1.2. Contribución del trabajo .....	3
1.3. Organización del documento .....	3
CAPITULO II .....	4
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA .....	4
2.1. Consumo de combustibles en Colombia.....	4
2.2. Transformación de energía en vehículos .....	5
2.3. Eficiencia energética en vehículos.....	6
2.3.1. Estrategias tecnológicas .....	9
2.3.2. Estrategias operacionales .....	11
2.4. Análisis de estrategias .....	14
2.4.1. Análisis de estrategias tecnológicas.....	14
2.4.2. Análisis de la conducción eficiente.....	15
CAPITULO III.....	17
3. MEDICIÓN DE CONSUMO DE COMBUSTIBLE EN VEHÍCULOS .....	17
3.1. Metrología en la medición de consumo de combustible en Colombia.....	17
3.2. Ciclos de conducción .....	18
3.2.1. <i>New european driving cycle (NEDC)</i> .....	18
3.2.2. <i>The worldwide harmonized light vehicles test cycles (WLTC)</i> .....	19
3.2.3. <i>Federal test procedure (FTP-75)</i> .....	21
3.3. Selección de metodología de pruebas .....	22

3.4.	Metodología para la medición de consumo de combustible .....	25
3.4.1.	Prueba de <i>Coast Down</i> .....	26
3.4.2.	Medición de consumo de combustible en laboratorio .....	28
3.4.3.	Metodología para la medición de consumo de combustible en ruta .....	30
3.4.4.	Modelo de cálculo.....	31
3.4.5.	Modelo de estimación de incertidumbre para pruebas.....	36
3.5.	Implementación de la metodología en laboratorio .....	40
<hr/>		
	CAPITULO IV .....	44
4.	RESULTADOS IMPLEMENTACIÓN DE LA CONDUCCIÓN EFICIENTE .....	44
4.1.	Implementación de una estrategia de eficiencia energética.....	44
4.1.1.	Determinación de las condiciones de operación del vehículo.....	45
4.1.2.	Resultados pruebas de laboratorio .....	47
4.1.3.	Resultados pruebas en ruta .....	49
4.2.	Análisis de la conducción eficiente en la ciudad de Pereira .....	54
<hr/>		
	CAPITULO V .....	57
5.	CONCLUSIONES .....	57
	RECOMENDACIONES .....	60
	BIBLIOGRAFÍA .....	61
	APÉNDICE .....	1
	ANEXO 1 .....	7



## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Tecnologías vehiculares evaluadas en ciclos de conducción[28].	7
<b>Tabla 2.</b> Tecnologías implementadas en vehículos livianos [25], [26], [32]–[35].	8
<b>Tabla 3.</b> Características de los ciclos de conducción.	19
<b>Tabla 4.</b> Parámetros del Ciclo WLTC, Clase 3.	20
<b>Tabla 5.</b> Características del ciclo FTP-75.	21
<b>Tabla 6.</b> Criterios de selección entre las metodologías americana y europea.	23
<b>Tabla 7.</b> Fuerzas de resistencia al movimiento.	32
<b>Tabla 8.</b> Determinación de los coeficientes de resistencia al movimiento [76].	34
<b>Tabla 9.</b> Coeficientes de sensibilidad en pruebas de laboratorio.	39
<b>Tabla 10.</b> Coeficientes de sensibilidad en pruebas de ruta.	40
<b>Tabla 11.</b> Clasificación de vehículos por clase [81].	41
<b>Tabla 12.</b> Cantidad de automóviles por cilindraje [81].	41
<b>Tabla 13.</b> Principales marcas de vehículos con cilindraje menor a 1800 cm <sup>3</sup> [81].	41
<b>Tabla 14.</b> Ensayos de consumo de combustible en laboratorio.	42
<b>Tabla 15.</b> Resultado de pruebas de par, potencia y consumo específico.	45
<b>Tabla 16.</b> Ensayos de consumo de combustible en laboratorio.	47
<b>Tabla 17.</b> Ensayos de conducción eficiente en laboratorio.	48
<b>Tabla 18.</b> Ensayos de consumo de combustible en ruta sin conducción eficiente.	50
<b>Tabla 19.</b> Análisis de datos obtenidos en pruebas de ruta sin conducción eficiente.	51
<b>Tabla 20.</b> Ensayos de conducción eficiente en ruta.	52
<b>Tabla 21.</b> Análisis de la conducción eficiente en pruebas de ruta.	53
<b>Tabla 22.</b> Comparación en el consumo de combustible.	54
<b>Tabla 23.</b> Análisis de emisiones en la implementación de conducción eficiente.	55
<b>Tabla 24.</b> Clasificación de vehículos Estados Unidos.	4
<b>Tabla 25.</b> Clasificación de vehículos Unión Europea.	5

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Consumo de energéticos del sector transporte 2015 [22].	4
<b>Figura 2.</b> Consumo nacional de Diésel 2015 [22].	5
<b>Figura 3.</b> Consumo nacional de gasolina 2015 [22].	5
<b>Figura 4.</b> Balance de energía en automóviles [23].	5
<b>Figura 5.</b> Rangos de reducción del consumo energético por factores tecnológicos [25], [26], [32]–[35].	8
<b>Figura 6.</b> Costo de tecnologías respecto al rendimiento de combustible [54].	14
<b>Figura 7.</b> Ciclo de pruebas europeo NEDC.	19
<b>Figura 8.</b> Ciclo WLTC para vehículos Clase 3b.	20
<b>Figura 9.</b> Ciclo de manejo estadounidense EPA – FTP75.	21
<b>Figura 10.</b> Origen de los vehículos en Colombia 2015 a 2018.	22
<b>Figura 11.</b> Protocolo para ejecutar pruebas de <i>Coast Down</i> en ruta.	26
<b>Figura 12.</b> Protocolo para ejecutar pruebas de <i>Coast Down</i> en laboratorio.	27
<b>Figura 13.</b> Protocolo de pruebas de consumo de combustible en laboratorio.	28
<b>Figura 14.</b> Módulo de combustible para pruebas de laboratorio.	29
<b>Figura 15.</b> Montaje de prueba de consumo de combustible en laboratorio.	29
<b>Figura 16.</b> Protocolo de pruebas de consumo de combustible en ruta.	30
<b>Figura 17.</b> Sistema externo para alimentación del motor en pruebas de ruta.	31
<b>Figura 18.</b> Prueba de normalidad Anderson-Darling.	43
<b>Figura 19.</b> Etiquetado energético vehicular de Estados Unidos.	43
<b>Figura 20.</b> Procedimiento para la evaluación de la conducción eficiente.	44
<b>Figura 21.</b> Pruebas de Torque Vs Potencia.	45
<b>Figura 22.</b> Pruebas de Consumo Específico Vs Torque.	46
<b>Figura 23.</b> Comparación del rendimiento de combustible.	48
<b>Figura 24.</b> Ruta representativa para pruebas de conducción eficiente.	49
<b>Figura 25.</b> Dispersión de datos en pruebas de ruta.	51
<b>Figura 26.</b> Dispersión de datos en pruebas de conducción eficiente en ruta.	53
<b>Figura 27.</b> Ahorro económico en la implementación de la conducción eficiente.	54
<b>Figura 28.</b> Comparación de resultados y tiempo de ejecución en horas valle.	56
<b>Figura 29.</b> Comparación de resultados y tiempo de ejecución en horas pico.	56

## LISTA DE SIMBOLOS

$a$	Aceleración [m/s <sup>2</sup> ]
$C$	Consumo de combustible [l/100 km]
$D$	Diámetro de los rodillos [m]
$d$	Distancia en ruta recorrida por el vehículo [m]
$F$	Fuerza de arrastre global [N]
$F_A$	Fuerza de arrastre aerodinámico [N]
$F_D$	Resistencia aerodinámica [N]
$F_g$	Resistencia por empuje gravitacional [N]
$F_I$	Resistencia inercial [N]
$F_{int}$	Resistencia mecánica [N]
$F_M$	Fuerza de arrastre mecánico [N]
$F_{RR}$	Resistencia a la rodadura [N]
$f_0$	Coeficiente de resistencia a la rodadura [N]
$f_1$	Coeficiente de resistencia por pérdidas internas en el tren motriz (fricción sólido – sólido e inercia) [N·s/m]
$f_2$	Coeficiente de resistencia por arrastre aerodinámico [N·s <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> ]
$K_P$	Factor de corrección por presión [m/s] <sup>-2</sup>
$k_T$	Factor de corrección por temperatura [K <sup>-1</sup> ]
$m$	Masa de combustible consumida [kg]
$m_v$	Masa del vehículo [kg]
$n$	Número de repeticiones de prueba [-]
$P$	Presión atmosférica [kPa]
$R$	Rendimiento de combustible del vehículo [km/l]
$T$	Temperatura ambiente [K]
$t$	Tiempo [s]
$U(R)$	Incertidumbre expandida asociada a la medición de las variables [km/l]
$v$	Velocidad del vehículo [m/s]

## Símbolos griegos

$\sigma_{f_1}$	Desviación estándar del coeficiente de resistencia a la rodadura [N]
$\sigma_{f_2}$	Desviación estándar del coeficiente resistencia aerodinámica [N·s <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> ]
$\rho_{comb}$	Densidad del combustible de prueba [kg/m <sup>3</sup> ]



## CAPITULO I

### 1. INTRODUCCIÓN

La creciente demanda en el consumo de energéticos en el mundo ha fomentado hábitos conducentes al uso racional y eficiente de la energía. Esto se puede lograr a partir de programas de gestión energética, usando diferentes estrategias enfocadas a la operación adecuada y al aumento de la eficiencia de los procesos, en sectores productivos tales como: industrial, agropecuario, comercial, público, minero y transporte [1].

Particularmente, el sector transporte ha sido reconocido mundialmente como el sector productivo con mayores pérdidas de energía, puesto que los motores de combustión interna presentan una baja eficiencia de operación. Además de los gases de efecto invernadero (GEI), el sector transporte aporta significativamente otras fuentes contaminantes tales como ruido y calor, productos de la combustión presente en los vehículos y el tránsito urbano [2]. Timilsina y Shrestha [3], reportan que, en la mayoría de los países de Asia el sector transporte representa una parte sustancial del total nacional de las emisiones de CO<sub>2</sub> y que por lo tanto, cualquier intento de abordar el cambio climático, debe prestar atención a las emisiones del sector transporte, convirtiéndose en un punto clave para la formulación de políticas y estrategias efectivas de mitigación del cambio climático.

Países como: Estados Unidos, China, México, Brasil, Chile y algunos de la Unión Europea, tienen trascendencia en estudios donde evalúan el consumo energético del sector transporte y aportan soluciones y normativas para mejorar el rendimiento de combustible en los vehículos, promoviendo el uso de tecnologías, combustibles más limpios, conducción eficiente y el etiquetado energético, con la intención de concientizar de manera global a los usuarios desde la compra y la operación, así las personas particulares también pueden aportar hacia un transporte sustentable [4]–[8].

Andrejić, Bojovic y Kilibarda [9], proponen modelos de análisis de componentes principales de las flotas de vehículos y involucramiento de datos, para medir e identificar los factores que afectan la eficiencia del transporte, tales como: el sistema de gestión de flotas, la antigüedad del vehículo, la capacidad, la infraestructura y la topografía vial. Para esto, se deben tener en cuenta las variables que inciden en el aumento del consumo de combustible y emisiones de GEI en los vehículos. Es por eso que Wu *et al.* [10], hacen referencia a que es necesario

implementar una metodología de pruebas para la medición del impacto ambiental y de consumo de energía, de esta forma medir las estrategias de eficiencia energética en el sector transporte, ya que esto puede proporcionar mucha información para la toma de decisiones de quienes buscan mejorar el rendimiento del transporte.

Se estima que en Colombia el sector transporte es el responsable del 44% del consumo energético y el principal consumidor de combustibles derivados del petróleo. Según la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) [11], este sector consume casi el 47% del diésel de todo el país y un 29% de las gasolinas. Adicionalmente, el consumo de gasolina y diésel para el transporte por carretera tiene una tasa de crecimiento más rápido que en otros sectores y sus emisiones presentan una trayectoria ascendente en un futuro próximo [12], [13].

Lo anterior evidencia la necesidad de identificar e implementar estrategias de eficiencia energética y uso racional de la energía en los vehículos del sector transporte por carretera en Colombia, así como implementar una metodología de pruebas confiable que permita medir el comportamiento del consumo de combustible, bajo diferentes condiciones de operación, con el fin de realizar una evaluación comparativa de los resultados de las tecnologías o estrategias implementadas. Debido a la problemática planteada, se pretende dar solución al siguiente interrogante: ¿Qué estrategia de eficiencia energética proponer para aumentar el rendimiento de combustible de los vehículos livianos del sector transporte por carretera en Colombia y qué metodología de pruebas adoptar para evaluar las estrategias?

Por otro lado, Irani y Chalak [14] ratifican la importancia de establecer límites para las emisiones presentes en el sector transporte, además de diseñar e implementar tecnologías alternativas, incluyendo biocombustibles y políticas que estructuren medidas de mitigación adecuadas. Las tecnologías alternativas se introducen generalmente en dos opciones; el cambio de combustible y las opciones de eficiencia energética. La opción de cambio de combustible podría reducir significativamente la cantidad de emisiones de GEI en un plazo de tiempo relativamente corto, aunque estará limitado por sus recursos de suministro y por la economía de escala de los vehículos que los emplean; mientras que la opción de la eficiencia energética es más eficaz para moderar estas emisiones en el largo plazo [15]. Lo anterior con el fin de reducir la dependencia del uso de los combustibles fósiles, y generar

un impacto social, teniendo en cuenta la economía y sobre todo la influencia que tiene la reducción de los gases contaminantes y los GEI en la salud de los habitantes [16], [17].

Otros estudios conducen a la reducción del consumo de combustible y con ellos a la tasa de emisiones de los GEI, por ejemplo, Karthikeya, Amba y Maghu [18], en su estudio logran una reducción de las emisiones de NOx en el modo HCCI (carga homogénea encendido por compresión) de operación, instalando carga premezclada en la cámara de combustión asistida con un movimiento de remolino para mejorar la transferencia de calor por convección en el interior de la misma. Debido a que con la mezcla se realiza combustión a baja temperatura, las emisiones de los óxidos de nitrógeno (NOx), se reducen drásticamente y la economía de combustible se mejora.

Igualmente, Ribau, Silva y Sousa [19], en su estudio muestran que, los vehículos híbridos alimentados con pila de combustible (FC-HEV) y los vehículos eléctricos híbridos tipo "*Plug-In*" (PHEV-FC), están siendo considerados por la industria automotriz como una mejor y sostenible tecnología, con relación a los vehículos convencionales. Sin embargo, la propulsión híbrida plantea nuevos retos en el diseño del sistema de propulsión del vehículo, poniendo en relieve la importancia de las condiciones de conducción, la optimización de los costos de inversión, la eficiencia y el impacto del ciclo de vida.

Estudios de proyección del consumo energético del transporte realizados en Colombia, han generado una preocupación y un compromiso por parte del gobierno en la reducción del consumo de combustible y las emisiones de CO<sub>2</sub>. Actualmente, la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) plantea algunas temáticas y actividades con el fin de cumplir con este objetivo, entre las cuales se encuentra: la Mesa de Trabajo con la Secretaría Distrital de Ambiente, en la cual se impulsa la introducción de taxis eléctricos en Bogotá, la Mesa Interministerial (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible – MinTransporte - UPME), en donde se impulsa la incorporación de tecnologías vehiculares limpias, la mesa de formulación (UPME, MinTransporte e ICONTEC), por la cual se realizan propuestas normativas de estándares de eficiencia energética para vehículos y la propuesta de incentivos para tecnologías eficientes en el sector transporte público por parte de la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA) y la UPME [20].

En resumen, la reducción en el consumo de energía del sector transporte está en una posición clave. La eficiencia energética en el sector transporte por carretera se enfoca en disminuir el combustible de los vehículos por kilómetro recorrido, en otras palabras, aumentar su rendimiento. Las medidas para lograr esto requieren un enfoque integrado de la formulación de políticas a nivel nacional, departamental y local [21]. Por lo tanto, la implementación de estrategias de gestión energética sobre los vehículos del sector transporte por carretera en Colombia y su evaluación mediante una metodología de pruebas adecuada, resulta ser atractivo tanto para el país como para el usuario, ya que no sólo se puede obtener un impacto positivo sobre la matriz energética y dar soporte a las regulaciones o políticas energéticas y ambientales, sino que se lograrían adquirir beneficios económicos para los usuarios.

## **1.1. Objetivos**

### **1.1.1. Objetivo general**

Evaluar una estrategia de eficiencia energética en un vehículo liviano del sector transporte mediante una metodología de medición del consumo de combustible.

### **1.1.2. Objetivos específicos**

- Identificar estrategias de eficiencia energética aplicables a vehículos livianos del sector transporte.
- Definir la metodología de pruebas para la medición del consumo de combustible en vehículos, identificando variables de medición y desarrollando un modelo de incertidumbre.
- Implementar una estrategia de eficiencia energética en un vehículo liviano del sector transporte en Colombia.
- Realizar un análisis comparativo de la estrategia de eficiencia energética implementada, con miras al aumento de la eficiencia en los vehículos livianos del sector transporte.



## **1.2. Contribución del trabajo**

En este trabajo se pretende contribuir con la medición del rendimiento de combustible de vehículos livianos en Colombia, mediante protocolos que se encuentren respaldados por un aseguramiento metrológico, así promover el etiquetado energético vehicular y evaluar estrategias de eficiencia energética aplicables.

Para el desarrollo del proyecto se analizaron metodologías internacionales para la medición de consumo de combustible, y considerando la actualidad del mercado automotriz del país, se adoptó e implementó la metodología americana en el Laboratorio de Pruebas Dinámicas Automotrices de la Universidad Tecnológica de Pereira, cumpliendo con los procedimientos de medición y ciclo de manejo. Adicionalmente, siguiendo los estándares internacionales se estableció un protocolo para la medición de consumo de combustible en ruta. Así mismo, se implementó un aseguramiento de carácter metrológico a las variables medidas y resultados obtenidos, fortaleciendo el nivel de participación de la metrología en la gestión energética del transporte, agregando reproducibilidad y repetibilidad en los ensayos.

## **1.3. Organización del documento**

El documento cuenta con el siguiente orden:

En el Capítulo 2, se presenta la revisión bibliográfica en relación con el consumo de combustibles en Colombia y las estrategias tecnológicas y operacionales de eficiencia energética que han sido evaluadas en vehículos livianos. Adicionalmente, se escoge una estrategia con el fin de implementarla y analizar los impactos asociados.

En el Capítulo 3, se presentan algunos ciclos de conducción de metodologías de consumo de combustible para vehículos livianos, la selección de una metodología representativa para Colombia y la selección del vehículo de pruebas. Igualmente, se presenta el procedimiento para la implementación de la metodología de medición del consumo en laboratorio y ruta.

En el Capítulo 4, se presenta la implementación de la estrategia de eficiencia energética seleccionada y se analiza el rendimiento, las emisiones y los ahorros en el combustible.

En el Capítulo 5, se presentan las conclusiones del proyecto, las recomendaciones para posibles futuros trabajos y la bibliografía empleada para el desarrollo del proyecto de grado.

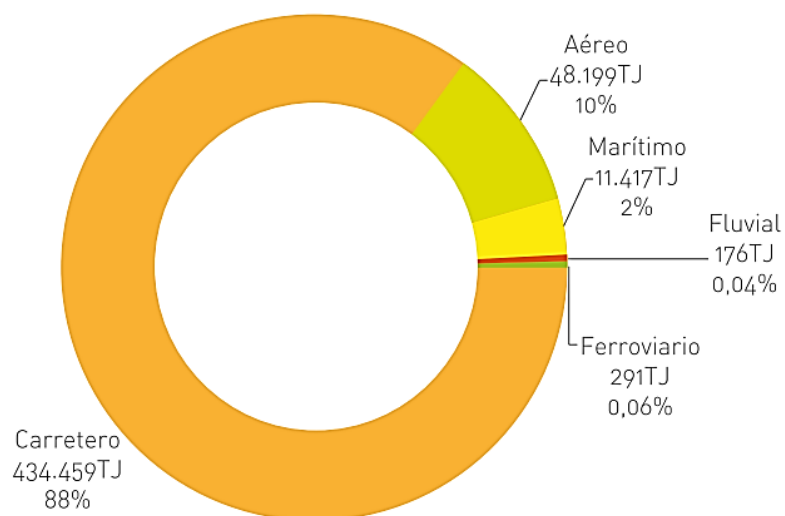
## CAPITULO II

### 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En este capítulo se presenta una descripción de estudios realizados respecto al consumo de combustibles en Colombia, la transformación de la energía en los vehículos de combustión interna, así como la gestión energética en el sector transporte y algunas estrategias de eficiencia energética tecnológicas u operacionales implementadas en vehículos livianos.

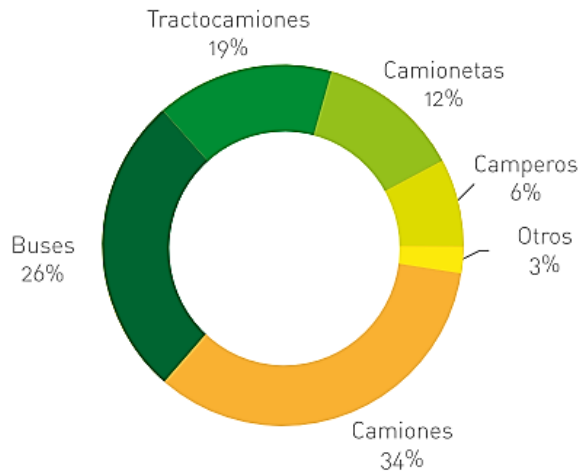
#### 2.1. Consumo de combustibles en Colombia

En Colombia el estudio del consumo de energéticos en el sector transporte presenta que el 88% de la energía disponible se consume en el transporte por carretera ver Figura 1. Esta energía se encuentra en diferentes formas, sin embargo, los energéticos de mayor importancia son el Diésel y la gasolina con una participación del 37% y 40% respectivamente [22].

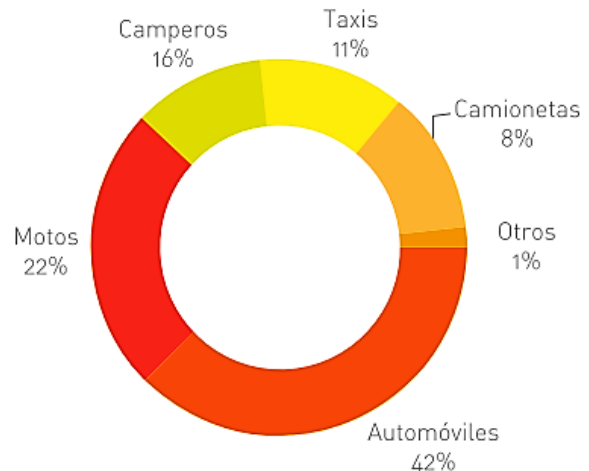


**Figura 1.** Consumo de energéticos del sector transporte 2015 [22].

En el Diésel los mayores responsables del consumo son los camiones con un 34% y los buses con un 26%, ver Figura 2. Por otro lado, las motocicletas participan con un 22%, mientras que los automóviles representan un 42% en el uso final de gasolina destinada al transporte, ver Figura 3. Con base en lo anterior, se destaca que lo concerniente con el consumo de gasolina, tanto las motocicletas como los automóviles son un objetivo relevante de estudio a la hora de buscar reducir el consumo de combustibles.



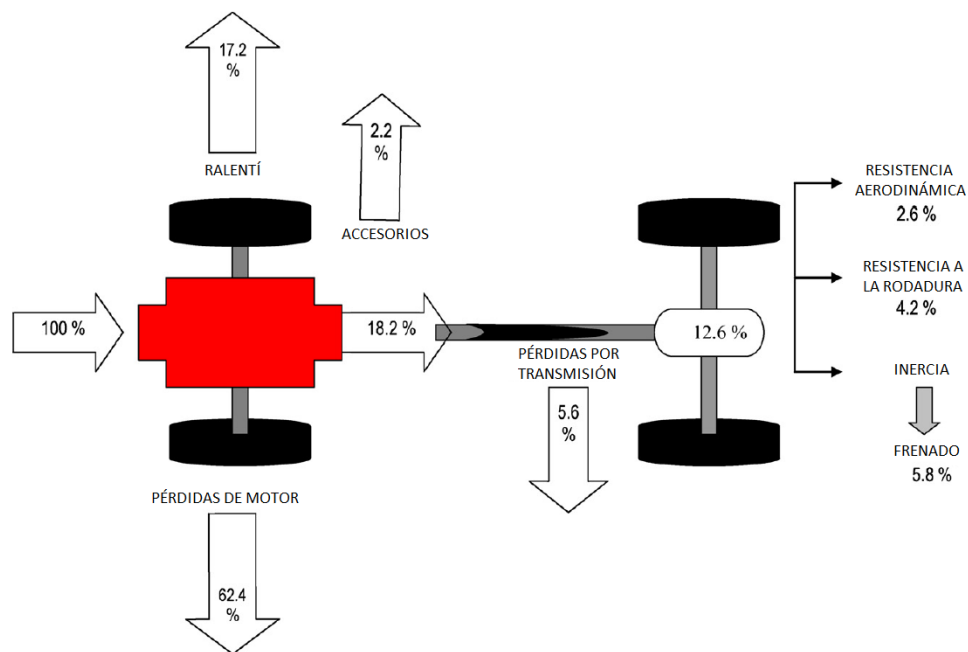
**Figura 2.** Consumo nacional de Diésel 2015 [22].



**Figura 3.** Consumo nacional de gasolina 2015 [22].

## 2.2. Transformación de energía en vehículos

Los automóviles convencionales sólo un tercio de la energía química contenida en el combustible se convierte en energía de movimiento, aquella que no se convirtió en trabajo útil, se transforma principalmente en energía térmica, la cual se libera en el medio ambiente en forma de calor residual [23]. La Figura 4, muestra el balance de energía de un vehículo tipo automóvil, se identifican las principales pérdidas de energía (transmisión, motor, accesorios, ralentí) y las fuerzas restrictivas al movimiento (aerodinámica, rodadura, inercia).



**Figura 4.** Balance de energía en automóviles [23].

En la figura anterior, se puede observar que en los automóviles tan sólo el 12,6 % de la energía química del combustible se transforma en energía mecánica en las ruedas. Un 62,4 % de la energía se disipa a través del motor de combustión interna (en forma de calor, refrigeración y energía química), mientras que el 17,2 % se pierde o se disipa en los periodos de ralentí (cuando el vehículo permanece encendido sin moverse), el 2,2 % se disipa en el funcionamiento de los accesorios del vehículo y 5,6% se pierde en la transmisión del movimiento (engranajes, acoples, entre otros) hasta llegar a las ruedas. De allí, la energía se utiliza para vencer las fuerzas a la aerodinámica, rodadura e inercia, o para restringir la velocidad haciendo uso del freno.

### **2.3. Eficiencia energética en vehículos**

Ante las necesidades actuales de hacer uso eficiente de la energía y los compromisos a nivel mundial de disminuir los impactos negativos sobre el ambiente, relacionados con los procesos de transformación energética, el sector transporte, como protagonista en cuanto al consumo en la canasta energética mundial, se ve obligado a establecer estrategias que mitiguen los problemas mencionados, efectuando estudios con miras a evaluar, idear e implementar eficiencia energética en vehículos [24].

Actualmente los esfuerzos se concentran en mejorar los factores tecnológicos en el vehículo y humanos en la operación. En un estudio, se identifica que realizar cambios en las características del vehículo, como la reducción de un 10% del peso promedio, mejorar el perfil aerodinámico en un 10%, reducir un 20% la resistencia a la rodadura de los neumáticos y aumentar un 7,5% la eficiencia del tren de potencia, pueden conducir a la reducción de hasta un 13% de las emisiones de CO<sub>2</sub> al ejecutar el nuevo ciclo de conducción europeo (*New European Driving Cycle* - NEDC) [25]. En el mismo sentido, se estima que en promedio un automóvil puede consumir 340 litros de combustible en el año para superar la fricción de los componentes (motor, transmisión y frenos) [26], lo cual podría reducirse, puesto que, pruebas de laboratorio ilustran que cambiar el aceite del motor a uno de menor viscosidad genera reducciones del consumo de combustible de hasta un 5% [27].

Fontaras, ha analizado diversas estrategias tecnológicas en componentes del motor, caja de cambios y resistencia al movimiento de los vehículos livianos, los efectos de la implementación se comparan en el NEDC y en el ciclo de pruebas para vehículos livianos armonizado (*The Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycles* - WLTC).

El estudio infiere que se pueden reducir entre 2% y 17% las emisiones de CO<sub>2</sub>, dependiendo el impacto de la estrategia en la operación del motor al ejecutar el ciclo [28]. En la Tabla 1, se observan las tecnologías evaluadas y la forma de implementación.

**Tabla 1.** Tecnologías vehiculares evaluadas en ciclos de conducción[28].

Componente del vehículo	Tecnología	Enfoque de simulación
Motor	Arranque - parada	Uso de componentes externos utilizados durante el recorrido
	Recuperación de energía (BERS)	Sistema eléctrico diferente
	Válvula de actuación variable (VVA)	Esquema diferente de consumo de combustible en el motor
	Inyección directa - Puerto de inyección	Esquema diferente de consumo de combustible en el motor
	Administración térmica	Modelo de arranque en frío diferente
Caja de cambios	Variación en la caja de cambios - Aceleraciones bajas	Variación en el número de cambios y en la relación de transmisión
Resistencia en la conducción	Reducción de resistencia aerodinámica y rodadura	Diferentes cargas en la carretera
	Reducción de peso	Diferente inercia vehicular

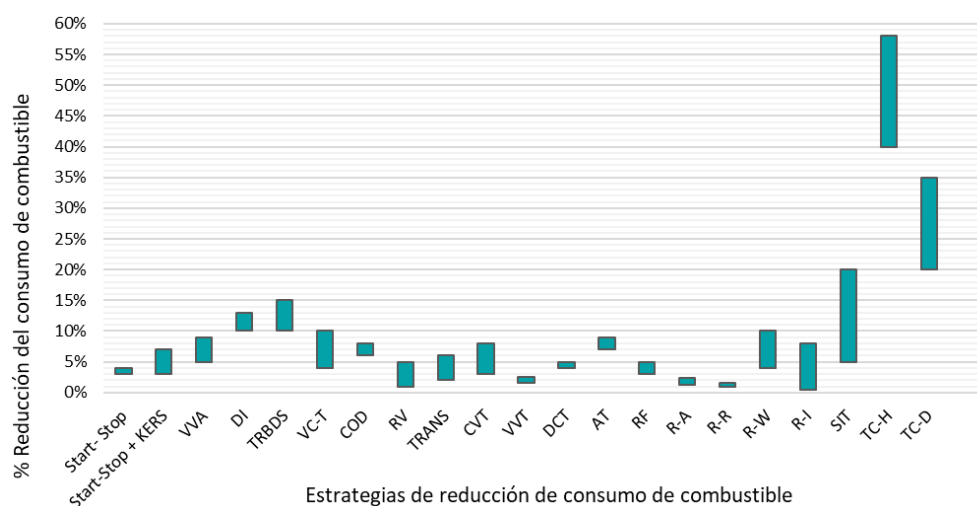
Por otro lado, se ha investigado el efecto de la conducción eficiente realizando recorridos con distancias predeterminadas en un dinamómetro de rodillos, encontrando que realizar cambios suaves de velocidad y mantener una velocidad constante podrían generar una reducción de hasta un 11.7% [29]. Según Sivak y Schoettle los factores sobre los que un conductor tiene control puede contribuir a una reducción de hasta un 45% en el ahorro de combustible por carretera, una magnitud que vale la pena tener en cuenta [30]. Igualmente, se determina que el uso de sistemas de transporte inteligente, tales como; sistemas de comunicación, gestión e información del tráfico urbano, asistencia en la conducción, entre otros, podrían ser una pronta solución para la reducción del consumo de combustible y las emisiones en el área urbana [31].

La revisión bibliográfica, permitió identificar tecnologías que han sido implementadas y evaluadas para aumentar el rendimiento de combustible en vehículos livianos encendidos por chispa, algunas han sido consideradas en las políticas federales de ahorro de combustible (*Corporate Average Fuel Economy* - CAFE) de los Estados Unidos [25], [26], [32]–[35]. A continuación, en la Tabla 2 se presentan algunas tecnologías evaluadas las cuales se enfocan en brindar beneficios tangibles a los consumidores.

**Tabla 2.** Tecnologías implementadas en vehículos livianos [25], [26], [32]–[35].

Componente vehicular	Tecnología Implementada
Motor	Arranque – Parada (Start-Stop)
	Arranque - Parada con freno regenerativo (Start-Stop + KERS)
	Válvula de actuación variable (VVA)
	Mejoras en el sistema de inyección directa (DI)
	Tiempo variable de válvula de admisión (VVT)
	Reducir la capacidad del motor con turbocargadores o sobrealimentación (TRBDS)
	Relación de compresión variable (VC-T)
	Desconexión selectiva de cilindros (COD)
	Lubricación de menor viscosidad (RV)
Transmisión	Variación en la caja de cambios (4, 5 y 6 velocidades) (TRANS)
	Transmisión variable continua (CVT)
	Transmisión de doble embrague o “clutch” (DCT)
	Transmisiones automáticas (AT)
	Reducción de la fricción de componentes mecánicos (RF)
Funcionamiento y conducción	Mejoras aerodinámicas (R-D)
	Reducción de resistencia a la rodadura (R-R)
	Reducción del 10% en el peso del vehículo (R-W)
	Reducción de ralentí (R Ralentí)
	Sistemas inteligentes de transporte (SIT)
Transición tecnológica	Hibridación (TC-H)
	Diésel (TC-D)

En la Figura 5, se presentan los rangos de reducción del consumo de combustible de las tecnologías expuestas en la tabla anterior, identificando que aquellas que involucran la transición tecnológica influyen con mayor efectividad sobre la eficiencia del vehículo.

**Figura 5.** Rangos de reducción del consumo energético por factores tecnológicos [25], [26], [32]–[35].

A continuación, se describen algunas estrategias de eficiencia energética tecnológicas y operacionales aplicables en vehículos livianos:

### 2.3.1. Estrategias tecnológicas

- **Tecnología del motor**

El funcionamiento del motor puede ser modificado para mejorar su desempeño de la siguiente forma:

**Inyección directa de combustible:** a diferencia de la inyección indirecta donde se realiza la premezcla de aire combustible en toberas del colector de admisión, la inyección directa, suministra el combustible al rail de los inyectores de alta presión, desde donde se distribuye la cantidad precisa directamente a la cámara de combustión, de esta forma garantiza la mezcla homogénea y los adecuados intervalos de alimentación para cada ciclo trabajo de los pistones [36].

**Desactivación de los cilindros o desplazamiento múltiple:** consiste en el desplazamiento bajo demanda, control activo de combustible y control variable de cilindraje. Esta tecnología desactiva algunos cilindros del motor cuando no son necesarios, cerrando las válvulas para que se deje de bombear combustible y entre aire en ellos. Esto convierte temporalmente un motor de 8 o 6 cilindros en uno de sólo 4 o 3 cilindros [37].

**Turbocargadores con disminución de motor:** debido a que los turbocargadores son compresores que impulsan aire adicional dentro de los cilindros del motor permitiendo la inyección de más combustible, el aire y combustible adicional crean más presión, esto permite que los fabricantes de autos usen motores más pequeños sin sacrificar el desempeño [38].

**Tecnologías de válvulas de tiempo variable:** incluyen la actuación variable de válvulas, tiempo variable de levas, sincronización de levas, sincronización variable de válvulas de tiempo y elevación de control electrónico. Las válvulas controlan el flujo de aire fresco que va a los cilindros y el flujo de la expulsión de gases de combustión. El momento en que se abren las válvulas y el tiempo que permanecen abiertas (elevación) afectan la eficiencia del motor, por lo tanto, se realiza una configuración de tiempo y elevación que varíe con la velocidad del motor [38].

- **Tecnologías de transmisión**

El tren motriz es una cadena cinemática que integra varios mecanismos encargados de transmitir la potencia del vehículo, dando lugar a incursionar en posibles mejoras de la siguiente forma [37]:

**Velocidades adicionales:** se puede añadir velocidades adicionales al motor para operar con mayor eficiencia de velocidad. Entre más opciones de velocidad tenga el vehículo será más eficiente, pueden utilizarse sexta, séptima y octava velocidad.

**Transmisión continuamente variable:** en lugar de cambios de velocidad, la CVT por sus siglas en inglés, usa un par de poleas conectadas por un cinturón o cadena que puede producir un número infinito de radios de velocidad variable motor-rueda, permitiendo una aceleración ininterrumpida sin tracción por parte de la cadena de cambios y una baja frecuencia de cambios durante los caminos con pendientes altas.

**Transmisión de doble *clutch*:** la tecnología DCT (*doble clutch transmission*) combina la eficiencia de las transmisiones manuales con la conveniencia de las automáticas. Las transmisiones automáticas son menos eficientes que las manuales debido a la pérdida parasítica. Los DCT operan casi como las transmisiones manuales, excepto que ellas usan dos embragues y un cambiador automático.

- **Energías alternativas**

La tendencia en el transporte es reducir la dependencia de petróleo y lograr que los vehículos sean limpios, seguros y energéticamente eficientes. Para ello, se plantea en las flotas de vehículos la implementación de combustibles alternativos obtenidos a partir de materia vegetal o residuos de alimentos (biocombustibles), gas natural vehicular, gas licuado de petróleo. Adicionalmente, el uso de energías renovables tales como; solar o eólica, las cuales pueden aportar energía eléctrica sostenible al funcionamiento de un vehículo reduciendo el consumo de fuentes fósiles en los vehículos híbridos o el costo de operación en los vehículos eléctricos [39].

- **Tecnologías de hibridación**

Un camino abierto hacia la reducción del consumo de combustible es la transformación o hibridación de los vehículos y los nuevos sistemas de control del vehículo, tales como [26]:



**Híbridos parciales:** son vehículos que cuentan con un motor eléctrico funcionando en serie o paralelo con el motor de combustión interna, estos incorporan tecnologías como; generador de encendido integrado, encendido de banda alternada con asistente electrónico (eAssist), sistemas de encendido-apagado para reducir el estado ralentí y el freno regenerativo para convertir la energía perdida durante el frenado en electricidad.

**Híbridos totales:** los híbridos totales usan sistemas de encendido-apagado y frenado regenerativo. En comparación con los híbridos parciales, estos tienen una batería y un motor más grande, esto permite que el motor eléctrico ayude al motor o impulse el vehículo cuando va a velocidades bajas.

- **Otras tecnologías**

Tecnologías adicionales que reducen los requerimientos de potencia del vehículo, son [33]:

**Reducción del peso del vehículo:** puesto que se necesita menor energía para impulsar un vehículo liviano que uno pesado, los fabricantes están reduciendo el peso mediante el diseño de vehículos que usen menos materiales y materiales más livianos o reducir su tren de potencia, sin comprometer el tamaño, la seguridad o la comodidad.

**Neumáticos de baja resistencia de rodadura:** un neumático en movimiento es continuamente deformado por la carga del vehículo aplicada sobre él causando pérdida de energía. Los cambios de los fabricantes a la forma, material y diseño, puede reducir la resistencia al rodaje y mejorar su ahorro de combustible.

**Artefactos que mejoran la aerodinámica:** son tecnologías que buscan reducir el coeficiente de arrastre aerodinámico aumentando la eficiencia del vehículo, estos pueden ser; carenado superior, frontal, trasero, inferior o cubre estanque, faldones laterales y creadores de vórtice.

### **2.3.2. Estrategias operacionales**

- **Logística, movilidad sostenible y optimización de rutas**

La movilidad urbana en conjunto con el desarrollo sostenible permite satisfacer las necesidades básicas de acceso a los bienes, trabajo, educación, ocio y la salud pública, además es asequible, opera de manera eficiente y restringe las emisiones del transporte. Para generar un acople correcto, se plantea la optimización de rutas basada en herramientas de toma de decisiones, por medio de una adecuada planificación y logística del transporte.

En general, son todas aquellas acciones que contribuyan a la mejora de la función de distribución, bien sea en términos de nivel de servicio, de mejora de la calidad, reducción de costos y emisiones contaminantes. Simulando escenarios de actuación en softwares especializados que ayudan a evaluar alternativas y realizar un diagnóstico futuro [40].

- **Conducción eficiente**

La conducción eficiente es un nuevo modo de conducir el vehículo, que tiene como objeto lograr mayor confort en la conducción, un bajo consumo de combustible y la reducción de la contaminación ambiental proveniente de la operación de los vehículos [41]. Esta se rige por reglas sencillas y eficaces que tratan de aprovechar las tecnologías que ofrecen los vehículos, para ello se crean manuales, capacitaciones y centro de enseñanza, por lo cuales se pretende instruir a la población en utilizar el medio de transporte privado de una forma más eficiente y racional. Los beneficios ligados a su implementación impactan al conductor, el vehículo y sus alrededores; reduciendo el costo de viaje, el mantenimiento, la gravedad de los accidentes y la contaminación auditiva, además, mejora la calidad del aire y el confort de la conducción, teniendo como ventaja que su costo de implementación es bajo [42].

Entre los factores relevantes que se evalúan en los estilos de conducción eficiente se encuentran; la velocidad, la aceleración, la desaceleración, la elección de ruta, el ralenti y los accesorios del vehículo [43]. A continuación, se definen las técnicas de conducción eficiente con base en los resultados de estudios previos, aportando de forma sencilla y clara los conceptos para motivar al conductor a introducirlas en su cotidianidad:

**Velocidad de conducción:** la velocidad constante es cotidianamente estudiada, se ha determinado que en China el consumo de combustible por unidad de distancia es menor si se conduce entre 50 km/h y 70 km/h [44]. En Estados Unidos, se definió que estas velocidades se encuentran entre 60 km/h y 80 km/h [45]. Por otro lado, se recomienda usar el control de crucero si el vehículo cuenta con ello, esto se debe a que cada motor de combustión presenta velocidades de menor consumo de combustible. Sin embargo, la velocidad en condiciones reales de operación no puede mantenerse constante, puesto que se debe considerar el tiempo del recorrido, la pendiente de la carretera, las señales de tráfico y el flujo vehicular, de esta forma mantener una conducción segura [46].

**Aceleración y desaceleración:** la aceleración y desaceleración son las acciones claves que se debe intervenir en la conducción agresiva. Se debe minimizar la

aceleración y el frenado innecesario, manteniendo la distancia entre vehículos, anticipando las eventualidades y manteniendo la posición del acelerador no más del 50% [47]. Se menciona que las reducciones de aceleraciones fuertes ahorraría la misma cantidad de combustible que la reducción de velocidad en las carreteras [48].

**Conducción en ralentí:** la implicación de la marcha en ralentí es que cada vehículo obtiene 0 km/l cuando se opera de esta forma. Se aconseja no encender el motor hasta que se encuentre listo para conducir, sin dejar el vehículo en modo calentamiento y en lo posible observar los cambios en el flujo o las señales del tráfico. El tiempo de inactividad en el tráfico congestionado o las intersecciones, podría reducirse desacelerando más rápido (soltando el acelerador y utilizando el freno del motor en lugar del freno de pie) y evitando aceleraciones innecesarias [49].

**Medidores:** una recomendación para poner en práctica la conducción eficiente, es el uso de medidores, con los cuales se puede realizar seguimiento a los patrones de conducción, como por ejemplo; medidor de revoluciones, GPS, *cruise control* (control programable de la velocidad de crucero), medidores de velocidad, distancia, posición y consumo de combustible [50].

**Planificación del viaje:** se ha estimado que la elección de la ruta utilizando un modelo de consumo y emisión de combustible puede resultar en un ahorro de energía entre 15% - 40% (sujeto a la infraestructura y la congestión) [51]. El tipo de ruta determina los perfiles de velocidad, aceleración o desaceleración y, en consecuencia, el ahorro de combustible. Se han modelado formas para determinar el camino con mínimo consumo y emisiones, permitiendo un equilibrio entre consumo, tiempo y distancia [52]. Actualmente estimar una ruta ideal en tráfico, pendiente, distancia de recorrido, se puede realizar con el uso de aplicaciones tecnológicas.

**Acondicionador de aire:** el acondicionador de aire es uno de los equipos con mayor incidencia en el consumo global de combustible. Para mantener una sensación de bienestar, se recomienda una temperatura interior del vehículo de 23°C - 24°C. A no ser que las condiciones del servicio requieran temperaturas más bajas, se aconseja utilizar el aire acondicionado solamente cuando se supere esta temperatura media. En general, temperaturas inferiores no suelen aportar mayor confort a los pasajeros [50].

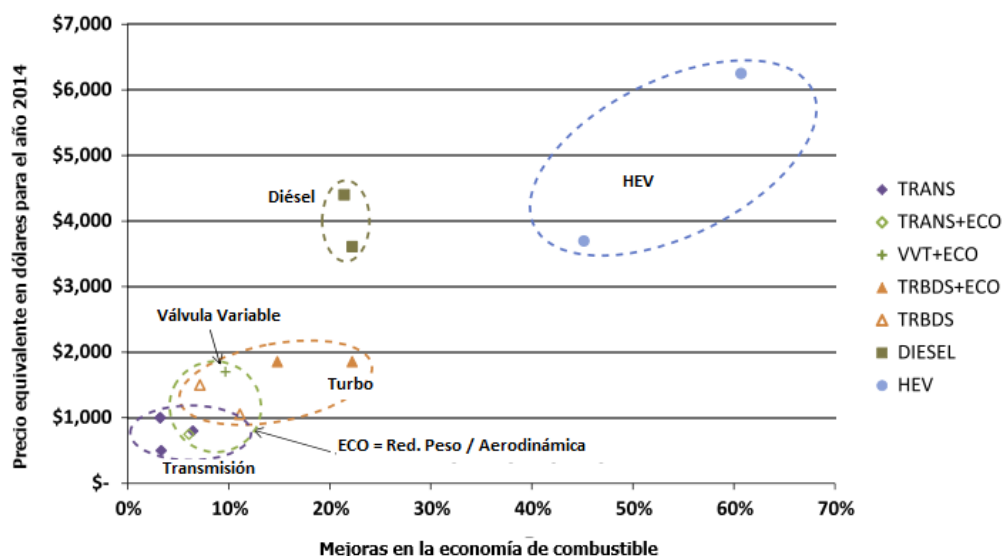
**Elección de la marcha de conducción:** la forma más sencilla para realizar el cambio de marcha en el instante preciso durante el desarrollo de la conducción es por medio de un contador de revoluciones, en aceleración:

- Para motores de vehículos livianos a gasolina debe ser entre 2000 RPM - 2500 RPM.
- Para motores de vehículos livianos diésel debe ser entre 1500 RPM – 2000 RPM.

## 2.4. Análisis de estrategias

### 2.4.1. Análisis de estrategias tecnológicas

Desde el punto de vista económico, algunos estudios identifican que los compradores de vehículos están dispuestos a implementar tecnologías para el ahorro del combustible que no excedan el 76% del valor de los posibles ahorros futuros, teniendo en cuenta que las tecnologías no deben afectar negativamente la conducción, el confort, u otras propiedades [53]. Para realizar un análisis sucinto de cual estrategia tecnológica podría ser más eficaz y atractiva para su implementación, Simmons *et al* [54]. realizan diagramas de costo beneficio, tal como se presenta en la Figura 6:



**Figura 6.** Costo de tecnologías respecto al rendimiento de combustible [54].

En la Figura 6, se puede apreciar que las mejoras tecnológicas en la transmisión, válvulas, turbocargadores, reducción de peso o aerodinámica, son de bajo costo de implementación y ofrecen aumentos leves en el rendimiento. Por otro lado, el cambio de fuente de energía a Diésel o la hibridización son de alto costo y proporcionan aumentos sustanciales.

Se menciona que el consumidor promedio puede invertir hasta \$1490 dólares para mejorar el rendimiento de combustible en un 17,3% anual. Sin embargo, el ahorro en promedio es insuficiente para cubrir los costos de implementación de la tecnología en el año, generando una reducción de interés por parte del consumidor. Las estrategias de reducción más eficaces deben incluir medidas de comportamiento combinadas con el desarrollo tecnológico. Las tecnologías necesitan tiempo para entrar al mercado y generar aceptación por los usuarios, en cambio, las mejoras en la operación en principio podrían ser implementadas mucho más rápido [47], [55].

#### **2.4.2. Análisis de la conducción eficiente**

La conducción eficiente ha mostrado alcanzar altos resultados en la reducción del consumo de combustible y los costos asociados al transporte. En Australia, los entrenamientos teóricos alcanzaron una reducción del 4,6 % en el uso de combustible, lo que equivale a un ahorro anual de 106,49 dólares australianos (AUD) [56]. Ho *et al.* obtuvieron un ahorro del 16% en el consumo de combustible en Singapur, concluyendo que aplicar esta estrategia puede generar reducciones inmediatas sin el tiempo de espera para la transformación del vehículo [57]. Igualmente, en Europa Jonkers *et al.* evalúan la adquisición de sistemas de conducción inteligentes que apoyan al conductor en la toma de decisiones, los cuales tienen un costo de 250 €, mencionando que estos son rentables si generan una reducción desde el 5% en el consumo para los conductores privados [58].

En Colombia aún se están planificando actividades de concientización ambiental y energética, con el fin de impulsar el uso racional y eficiente de la energía como parte habitual del comportamiento de las personas. Debido a esto, la inversión económica en tecnologías para el aumento del rendimiento de combustible por parte de particulares es reducida. Por lo tanto, la implementación global de la conducción eficiente, en principio podría verse reflejado mucho más rápido en la mejora de la calidad del aire y en la reducción del consumo del combustible de los vehículos en el país, considerando que el costo de inversión es bajo y los beneficios obtenidos influyen tanto en el conductor (reducción del estrés, confort, economía y seguridad), como en el vehículo (mantenimiento y vida útil), sin comprometer la velocidad del viaje, aportando sobre la construcción de un transporte sostenible.

Con base en lo anterior, para implementar y evaluar las diferentes estrategias tecnológicas u operacionales, se toma a consideración la disponibilidad de recursos tecnológicos, personal y equipos presentes en el Laboratorio de Pruebas Dinámicas Automotrices en donde se desarrolla el estudio. Por lo tanto, se escogió evaluar la conducción eficiente como estrategia de eficiencia energética aplicada a vehículos livianos. Además, teniendo en cuenta los antecedentes bibliográficos, el mercado tecnológico existente, la viabilidad de implementación y el costo beneficio, se considera que esta estrategia podría ser de mayor apogeo en Colombia. Adicionalmente, debido a que la conducción eficiente integra aspectos humanos, para la evaluación se plantean pruebas de laboratorio y ruta con varios conductores, así analizar aspectos como infraestructura, topografía, revoluciones, velocidad constante, uso de la inercia, entre otros. Para ello es necesario identificar las metodologías existentes para medir el consumo de combustible en laboratorio y en ruta, así como los requisitos técnicos de equipos de medición y personal para el desarrollo de los ensayos.

## **CAPITULO III**

### **3. MEDICIÓN DE CONSUMO DE COMBUSTIBLE EN VEHÍCULOS**

En este capítulo, se presentan ciclos de conducción, las metodologías asociadas a la medición del consumo de combustible y la comparación teórica de ellas, con el fin de seleccionar una metodología representativa para Colombia. Igualmente, se presenta el procedimiento de implementación de la metodología seleccionada en el Laboratorio de Pruebas Dinámicas Automotrices – LPDA de la Universidad Tecnológica de Pereira y se realiza un protocolo para la medición de consumo de combustible en ruta.

#### **3.1. Metrología en la medición de consumo de combustible en Colombia**

Con base en la revisión de las posibles estrategias de eficiencia energética, que pueden ser aplicables tanto en vehículos (nuevas tecnologías) como en el transporte (gestión y operación), se identifica que el impacto obtenido mediante la implementación de alguna de estas estrategias sólo puede ser determinado por un sistema de medición confiable.

En Colombia, la normativa que rige el transporte Resolución 910 de 2008 únicamente, reglamenta los niveles permisibles de emisiones contaminantes para fuentes móviles en prueba estática y la norma técnica NTC 42-45 simplemente determina las emisiones de vehículos prototipo, sin describir de manera detallada los procedimientos, los requerimientos técnicos del personal y los instrumentos para la ejecución de las pruebas dinámicas. En ese sentido, considerando que Colombia no cuenta con una normativa que regule la medición del consumo de combustible en vehículos bajo pruebas dinámicas de laboratorio, se identifica la necesidad de adoptar una metodología de pruebas que sea aplicable a los vehículos livianos del parque automotor colombiano.

Por lo tanto, mediante el proyecto de investigación “Estrategia de vinculación de la metrología en la gestión energética orientada al sector transporte” desarrollado entre la UTP y el Instituto Nacional de Metrología – INM, se realizó una jornada de capacitación en temas de medición de consumo de combustible y etiquetado energético vehicular por parte del Ingeniero Novgorodcev, quien fue el primer director de calidad del Instituto Nacional de Metrología en Brasil – INMETRO y desde el año 1983 implementa y coordina el Programa Brasileiro de Etiquetado. En esta, se mencionó que en Latinoamérica la Comisión

Panamericana de Normas Técnicas (COPANT), es la entidad encargada de regular las normas técnicas, incluyendo los ensayos vehiculares. Igualmente indicó que existen dos metodologías destacadas en la medición del consumo de combustible, el Código Federal de Regulación - CFR 40 de los Estados Unidos y el Reglamento No 83 de la Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa y mencionó que todos los países pertenecientes a la COPANT realizan las pruebas a los automotores bajo los estándares americanos a excepción de Argentina quienes siguen el modelo europeo. Además, recomendó implementar o adoptar la normativa establecida por la COPANT, ya que permite una mejor comunicación técnica y científica entre los países panamericanos. Por último, aclaró que las normas adoptadas por la COPANT están, en su mayoría, basadas en la normativa brasilera NBR 7024, ya que es el país a nivel panamericano que más desarrollo ha tenido en el tema.

Con base en lo anterior, se propone adoptar una metodología de pruebas internacional que se ajuste al mercado vehicular, a las condiciones topográficas y de infraestructura de las carreteras y que tenga en cuenta las características técnicas y tecnológicas de los laboratorios en Colombia, con el fin de realizar todo el proceso metrológico de la medición del consumo de energía en los vehículos livianos. A continuación, se presentan los ciclos referentes a las metodologías destacadas y sus características.

### **3.2. Ciclos de conducción**

Existen múltiples ciclos de conducción para determinar el consumo energético de los vehículos bajo las condiciones de operación de diferentes países. Entre los más reconocidos para realizar pruebas de homologación o etiquetado energético, se encuentran los realizados por los Estados Unidos, Europa y Japón, mediante el ciclo FTP 75, los ciclos NEDC o WLTC y el ciclo JC08, respectivamente. En este documento, se describen los ciclos europeos y el americano, puesto que en Colombia se opta por estos para las pruebas de homologación.

#### **3.2.1. *New european driving cycle (NEDC)***

El ciclo NEDC se caracteriza por su procedimiento de arranque en frío modificado y comienza con cuatro repeticiones del ciclo de conducción urbano (*Emission Test Cycle* - ECE) a baja velocidad y carga del motor, seguido del ciclo de conducción extraurbano (EUDC por sus siglas en ingles) el cual tiene en cuenta los modos de conducción agresivos y velocidades

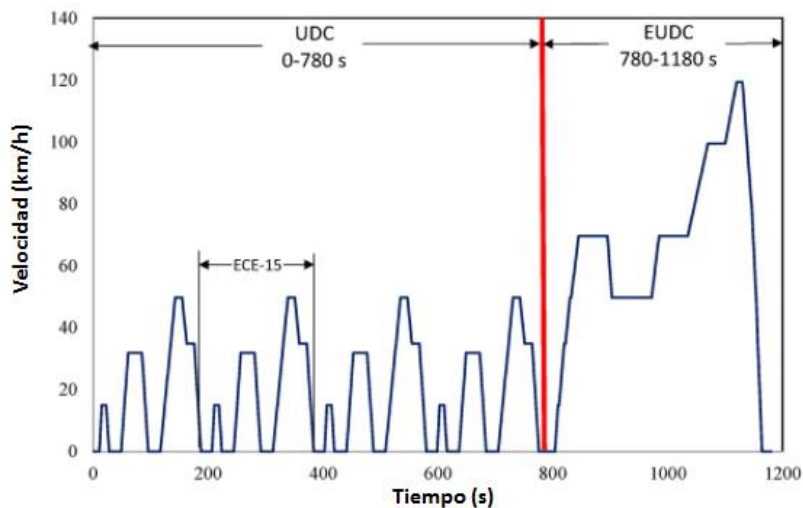


altas. En la Tabla 3, se resumen las principales características de los ciclos de pruebas implementados en Europa.

**Tabla 3.** Características de los ciclos de conducción.

Características	Unidad	ECE 15	EUDC	NEDC *
Distancia	km	0,9941	6,9549	10,9314
Tiempo total	s	195	400	1180
Tiempo de inactividad	s	57	39	267
Velocidad media (incl. paradas)	km/h	18,35	62,95	33,35
Velocidad promedio (excl. paradas)	km/h	25,93	69,36	43,10
Velocidad máxima	km/h	50	120	120
Aceleración media	m/s <sup>2</sup>	0,599	0,354	0,506
Aceleración máxima	m/s <sup>2</sup>	1,042	0,833	1,042
* Cuatro repeticiones del ECE 15, seguido por uno de EUDC				

En la Figura 7, se ilustra la representación del ciclo de pruebas NEDC [59].



**Figura 7.** Ciclo de pruebas europeo NEDC.

### 3.2.2. The worldwide harmonized light vehicles test cycles (WLTC)

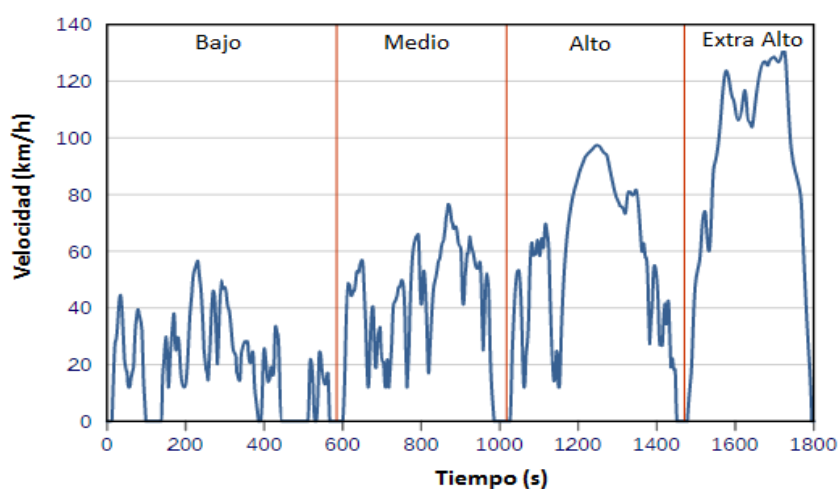
Este es el nuevo ciclo desarrollado por Europa para representar condiciones de operación de los vehículos y reemplaza el ciclo NEDC en las pruebas de consumo de combustible y emisiones de vehículos livianos. Este ciclo está subdividido por categorías de vehículos, según su relación potencia nominal – masa del vehículo (PMR) y su velocidad.

En la Tabla 4, se presentan las características de ciclo para la Clase 3, siendo esta la más alta relación potencia-masa, representativa de los automotores conducidos en Europa y Japón con un peso mayor a 1760 kg de encendido por gasolina o diésel [59].

**Tabla 4.** Parámetros del Ciclo WLTC, Clase 3.

Clase 3b ( $v_{\max} \geq 120$ km/h)						
Característica	Unidad	Baja 3	Medio 3-2	Alto 3-2	Extra-Alto 3	Total
Duración	s	589	433	455	323	1800
Duración de parada	s	156	48	31	7	242
Distancia	m	3095	4756	7162	8254	23266
Velocidad máxima	km/h	56,5	76,6	97,4	131,3	
Velocidad sin paradas	km/h	25,7	44,5	60,8	94	
Velocidad con paradas	km/h	18,9	39,5	56,7	92	
Aceleración máxima	m / s <sup>2</sup>	1,47	1,57	1,58	1,03	
Clase 3a ( $v_{\max} < 120$ km/h)						
Característica	Unidad	Baja 3	Medio 3-1	Alta 3-1	Extra-Alto 3	Total
Duración	s	589	433	455	323	1800
Duración de parada	s	156	48	31	7	242
Distancia	m	3095	4721	7124	8254	23194
Velocidad máxima	km/h	56,5	76,6	97,4	131,3	
Velocidad sin paradas	km/h	25,7	44,1	60,5	94	
Velocidad con paradas	km/h	18,9	39,3	56,4	92	
Aceleración máxima	m / s <sup>2</sup>	1,47	1,28	1,58	1,03	

En la Figura 8, se ilustra la representación del ciclo WLTC, para vehículos de Clase 3b identificando la velocidad y el tiempo para cada fase. En esta se observa que en la transición del ciclo de pruebas para Europa se agregó mayores puntos de aceleración y desaceleración que el ciclo NEDC, pasando a ser una aceleración dinámica, esto se debe a que las condiciones de operación (cantidad, infraestructura, formas de conducción) de los vehículos alrededor del mundo cambia constantemente, por lo tanto, en este ciclo se considera la inclusión de estas variables.

**Figura 8.** Ciclo WLTC para vehículos Clase 3b.

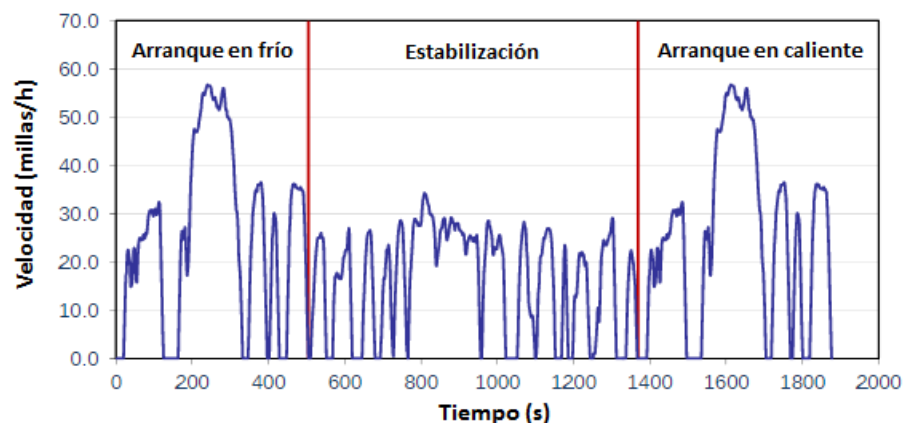
### 3.2.3. *Federal test procedure (FTP-75)*

El Procedimiento Federal de Prueba (FTP-75) ha sido usado para la certificación de emisiones y economía o rendimiento de combustible en vehículos livianos. El FTP-75 y el FTP-72 son dos ciclos de conducción urbanos para ser corridos en dinamómetro de rodillos. El ciclo FTP-75, surge como un derivado del ciclo FTP-72, con una adición de una tercera fase de 505 segundos, idéntica a la primera fase del FTP-72 pero con arranque en caliente. El ciclo de conducción FTP-75 consta de elementos como; fase transitoria de arranque en frío a temperatura ambiente entre 20 y 30 °C desde los 0 a 505 segundos del ciclo, fase estable desde el segundo 506 al 1372 y fase transitoria en caliente desde el segundo 1372 al 1877, sus características se presentan en la Tabla 5 [59]:

**Tabla 5.** Características del ciclo FTP-75.

Característica	Unidad	FTP-75
Duración	s	1876
Distancia	m	17770
Velocidad máxima	km/h	91,25
Velocidad promedio	km/h	34,1
Porcentaje de paradas	%	19,6

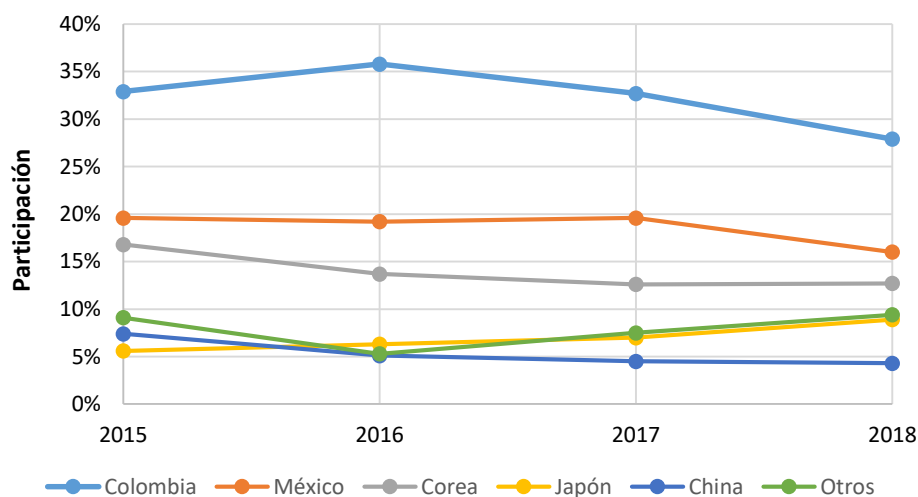
En la Figura 9, se ilustra la representación del ciclo de pruebas FTP-75, se identifican las zonas de arranque en frío, estabilización y arranque en caliente, con su determinado tiempo de duración.



**Figura 9.** Ciclo de manejo estadounidense EPA – FTP75.

### 3.3. Selección de metodología de pruebas

Actualmente, Colombia no cuenta con industrias fabricantes de vehículos, su principal función en el mercado es la transformación y ensamble de los automotores importados de diferentes países. Por lo tanto, conocer el lugar de origen de los vehículos comercializados a nivel nacional, se torna un factor determinante para seleccionar y definir las metodologías de medición del consumo de combustible aplicable en Colombia. Así, con el fin de determinar el origen de los automotores en Colombia se realizó la recopilación de la procedencia de vehículos comercializados en el país en los años 2015, 2016, 2017 hasta abril del 2018. A continuación, en la Figura 10 se presenta el origen de los vehículos en Colombia y el porcentaje de participación de los países [60]–[63].



**Figura 10.** Origen de los vehículos en Colombia 2015 a 2018.

Entre los países que emplean el método de ensayo de la Comisión Económica Europea están los pertenecientes a la Unión Europea, Argentina, Australia, China, Tailandia e India, entre otros. Por otro lado, entre los países que emplean el reglamento de los Estados Unidos para la ejecución de pruebas dinámicas automotrices están: Estados Unidos, Canadá, Brasil, Corea del sur y México, entre otros [64]. Siendo estos últimos los que representan el 41 % de los vehículos comercializados en el país hasta el 2018, se identifica que la metodología basada en la CFR 40 de los Estados Unidos es la más viable para implementación, puesto que permite la comparación directa de vehículos en temas de homologación y etiquetado. Sin embargo, se realiza una comparación teórica de las dos metodologías y sus ciclos de pruebas para identificar características técnicas y tecnológicas de cada una de ellas.

A continuación, en la Tabla 6 se presenta una comparación general entre la metodología americana y europea, con el fin de tener criterios de selección.

**Tabla 6.** Criterios de selección entre las metodologías americana y europea.

Metodología Europea	Metodología Americana
Generalidades:	
<ul style="list-style-type: none"> <li>Ciclo de manejo: <i>New European Driving Cycle</i> (NEDC), el cual es reemplazado por el <i>Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Cycle</i> (WLTC) en el 2017 [65].</li> <li>Las pruebas son realizadas por cada fabricante en compañía del personal técnico de un laboratorio aprobado [67].</li> <li>Para realización de las pruebas se selecciona la configuración del vehículo más "representativa" (Para el caso de las pruebas de emisiones contaminantes, se selecciona la configuración que genere el mayor nivel de emisiones) [67].</li> <li>El WLTP fue desarrollado principalmente por la Unión Europea, Japón, India y Corea del Sur, por lo que los mercados de estos países representan una implementación potencial de este procedimiento de prueba. Sin embargo existe la posibilidad de que otros mercados, como el de China, adopten esta metodología y adapten ciertos criterios estructurales del ciclo a sus condiciones particulares [65].</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ciclos de manejo: <i>Federal Test Procedure</i> FTP-75 (Ciclo urbano), US06 (Alta velocidad), SC03 (aire acondicionado), HWFT (Ciclo de autopista) [66].</li> <li>El FTP, al contemplar diferentes ciclos de manejo, se representa de una manera más aproximada a los datos reales de operación.</li> <li>Las pruebas son realizadas en conjunto entre fabricantes y la EPA [67].</li> <li>El FTP-75 se deriva de datos reales de operación de los vehículos [68].</li> <li>Para la realización de las pruebas se selecciona la configuración del vehículo que genere la mayor cantidad de emisiones contaminantes. Mientras que para las pruebas de rendimiento se selecciona la configuración más vendida [67].</li> <li>Los programas de EEUU son más complejos y más rigurosos al tiempo que proporcionan más flexibilidad a los fabricantes [66].</li> </ul>
Características técnicas:	
<ul style="list-style-type: none"> <li>El WLTC es el ciclo más demandante para los vehículos con tecnologías modernas, generando resultados de emisiones 15% mayores que el ciclo americano y 13% mayores que el NEDC [69].</li> <li>El WLTP categoriza los vehículos en 3 clases, dependiendo de la relación potencia-masa del vehículo. El ciclo de manejo se adapta a cada una de estas clases [70].</li> <li>Duración [s]: WLTC= 1800 / NEDC= 1180.</li> <li><math>V_{\max}</math> [km/h]: WLTC= 131,3 / NEDC= 120.</li> <li><math>V_{\text{prom}}</math> [km/h]: WLTC= 46,5 / NEDC= 33,6.</li> <li>%paradas: WLTC= 13,4% / NEDC= 24,8% [68].</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Los procedimientos de prueba Federal FTP-75 y los ciclos suplementarios consta de cuatro fases [66]: <ul style="list-style-type: none"> <li><b>Fase 1:</b> Fase de transición en frío de 505 s con un factor de carga de 0,43</li> <li><b>Fase 2:</b> Fase estabilizada de 867 s con un factor de carga de 1,0</li> <li><b>Fase 3:</b> Fase caliente de 10 min</li> <li><b>Fase 4:</b> Fase de transición en caliente en la cual se repite la primera fase de 505 s con un factor de carga de 0,57.</li> </ul> </li> <li>Duración [s]: FTP-75= 1876 s.</li> <li><math>V_{\max}</math> [km/h]: FTP-75= 91,3.</li> <li><math>V_{\text{prom}}</math> [km/h]: FTP-75= 34,1.</li> <li>%paradas: FTP-75= 19,6% [68].</li> </ul>

Aspectos importantes para selección	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Metodología nueva y en etapa de validación.</li> <li>• El NEDC presenta una diferencia entre los resultados reales y de laboratorio del 35 %, mientras que se estima, que para el año 2020, el WLTP presente diferencias del 23%, y del 31% para el año 2025 [71].</li> <li>• Implementado en la Unión Europea y países tales como: Argentina, Australia, Chile, China, Tailandia e India [64].</li> <li>• Estos países representan el 27% de los vehículos comercializados en el país durante el 2018.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Metodología ya madura y evolucionada.</li> <li>• Para el año 2012, los datos obtenidos mediante el protocolo de pruebas americano, presentan una diferencia del 35%, a comparación de los datos obtenidos en operación real [71].</li> <li>• Implementado en países tales como: Estados Unidos, Canadá, Brasil, Corea del sur, Chile, México [64].</li> <li>• Estos países representan el 41 % de los vehículos comercializados en el país durante el 2018.</li> </ul>

La evaluación comparativa de estas dos metodologías fue desarrollada en detalle por el Parlamento Europeo, mencionando que ambos sistemas pretenden garantizar que los vehículos cumplan con las normas pertinentes de consumo de combustible y emisiones. Sin embargo, el objetivo inicial de la legislación europea estuvo orientado a no proteger a los fabricantes de vehículos nacionales sin dañar el sistema del mercado interno. Esto condujo a un sistema de aprobaciones de tipo nacional en homologación con una supervisión permisiva. En cambio, los sistemas de los Estados Unidos se interesaron menos por el comercio y más por el cumplimiento de las normativas, generando diferencias en los procesos de aprobación, ciclos de prueba y dispositivos de detección de infracción. Igualmente, se denota que existen tres puntos clave que contribuyen a una mayor efectividad del sistema americano; el mandato de la *United States Environmental Protection (EPA)* por la protección de la salud humana y el medio ambiente, la mayor experiencia y recursos para dar cumplimiento a los casos de infracción y la falta de claridad de la Unión Europea respecto a la responsabilidad de identificar y perseguir los casos de infracción [72].

Por otro lado, la información técnica de las metodologías de la Unión Europea y los Estados Unidos descrita en la tabla anterior permite identificar que la velocidad máxima del ciclo FTP-75 está acorde con las condiciones de operación y reglamentos del parque automotor colombiano. Así mismo, Colombia hace parte de los países pertenecientes a COPANT, los cuales en su mayoría se basan en el CFR 40 de los Estados Unidos y en la norma de Brasil – NBR 7024 para la medición del consumo de combustible y las emisiones. En este sentido, con base en el mercado automotriz, las características técnicas y la orientación Panamericana, se determina que la metodología americana es la más apropiada para la realización de ensayos a vehículos livianos en el territorio nacional.

### **3.4. Metodología para la medición de consumo de combustible**

La CFR 40 de los Estados Unidos para la determinación del consumo de combustible de los vehículos livianos, así como sus adaptaciones en diferentes países como por ejemplo en Brasil, con la norma ABNT – NBR 7024, establece que la medición puede realizarse mediante tres métodos: balance de carbonos, gravimétrico y volumétrico. Además, los resultados deben ser presentados en términos de rendimiento en [km/l] para vehículos a gasolina, etanol o diésel y en [km/m<sup>3</sup>] para vehículos a GNV [73].

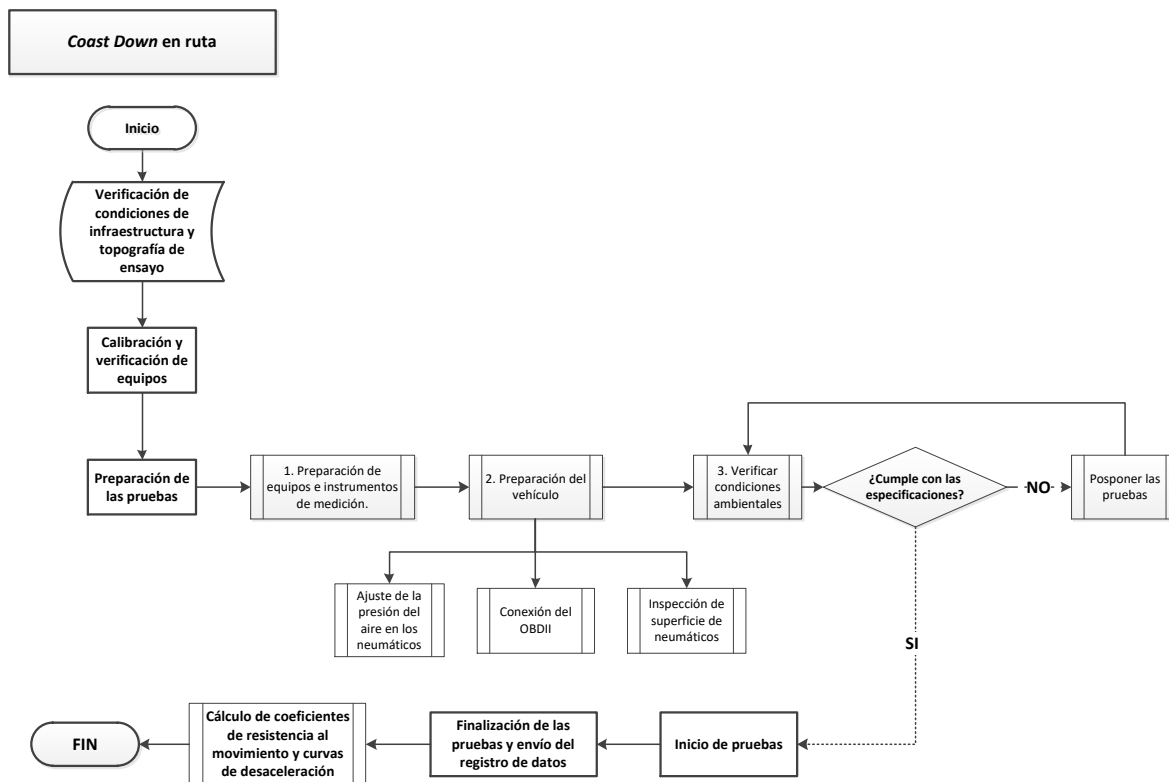
Con base en las capacidades técnicas y tecnológicas del Laboratorio de Pruebas Dinámicas Automotrices – LPDA de la UTP, se establece que los equipos disponibles permiten implementar el método gravimétrico. Así, considerando las normas de ensayo de los Estados Unidos, de Brasil, y de la Comisión Panamericana de Normas Técnicas, entre otros, en este trabajo fueron desarrollados los procedimientos y métodos de cálculo del consumo y rendimiento de combustible, incluyendo el cálculo de la incertidumbre en la medición, formulado con apoyo del Instituto Nacional de Metrología [73]–[77]. Los resultados se expresan en unidades de rendimiento [km/l], permitiendo una comparación directa con el etiquetado vehicular.

La metodología americana consiste en tres fases de desarrollo: i) Prueba de *Coast Down* en ruta, con la cual se estiman los coeficientes de resistencia a la rodadura y aerodinámica del vehículo de pruebas, ii) Prueba de *Coast Down* en laboratorio, mediante la cual se realiza una comparación de los coeficientes de resistencia obtenidos en laboratorio y en ruta, para posteriormente ajustar las curvas de desaceleración, con el fin de controlar las cargas ejercidas por el dinamómetro durante la prueba de consumo de combustible y iii) Medición del consumo de combustible incluyendo los coeficientes de resistencia al movimiento, replicando la operación real de los vehículos en condiciones controladas de laboratorio.

En el Anexo 1, se presenta en detalle los requerimientos en cuanto a las condiciones ambientales, verificación de parámetros y las recomendaciones generales, que se deben seguir para la ejecución de la metodología de consumo de combustible en laboratorio. A continuación, se presenta la descripción de las fases de prueba y sus procedimientos.

### 3.4.1. Prueba de *Coast Down*

Inicialmente se realiza la prueba de *Coast Down*, la cual consiste en la desaceleración de un vehículo de motor en una pista recta y plana, a partir de una velocidad inicial, hasta llegar a una velocidad final con el motor desembragado, determinando el tiempo que toma el vehículo en completar el delta de velocidades y la distancia recorrida. El ensayo permite determinar los coeficientes de resistencia a la rodadura y aerodinámica que presenta el automotor al realizar desaceleración libre en ruta, de esta forma agregar la fuerza de arrastre global del vehículo en las pruebas de consumo de combustible. En la Figura 11, se muestra el protocolo de pruebas que debe efectuarse para su implementación [76], [77]:



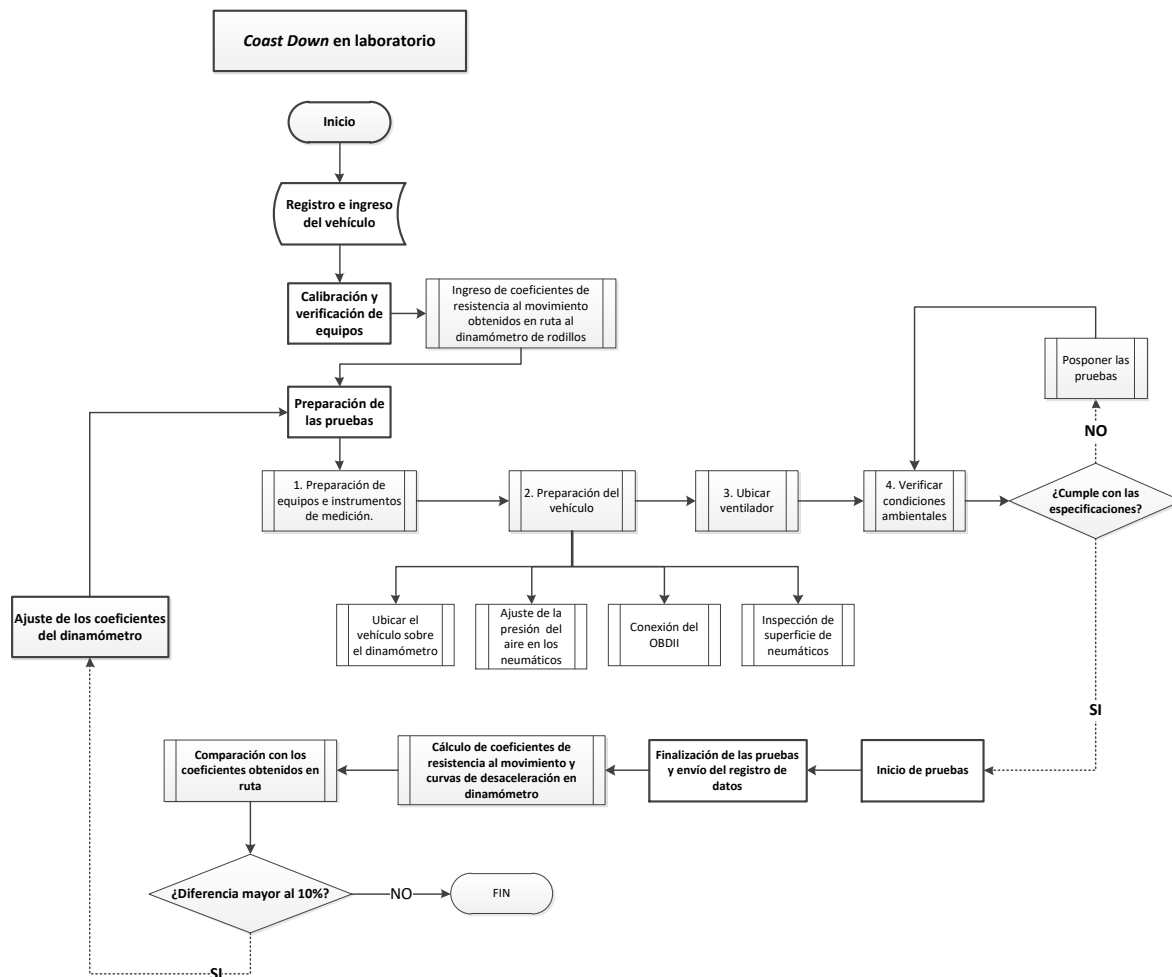
**Figura 11.** Protocolo para ejecutar pruebas de *Coast Down* en ruta.

Adicionalmente, se ejecuta el mismo ensayo en un dinamómetro de rodillos de laboratorio, se implementan los coeficientes de resistencia al movimiento determinados en ruta en el software dinamométrico, se realiza el cálculo de los coeficientes en laboratorio y se comparan con los obtenidos en ruta.



Posteriormente, se ajustan las curvas de desaceleración mediante un modelo analítico construido a partir de la NBR 10312, permitiendo establecer las cargas resistivas que serán ejercidas por el dinamómetro en los ensayos de consumo de combustible.

En caso tal de que los resultados no sean aproximados, se deben reajustar los coeficientes de resistencia al movimiento ingresados, y ejecutar nuevamente el ensayo. Este proceso debe ser iterativo hasta obtener una desviación no mayor al 10%. La Figura 12, presenta el protocolo a ejecutar para las pruebas de *Coast Down* en laboratorio [76].



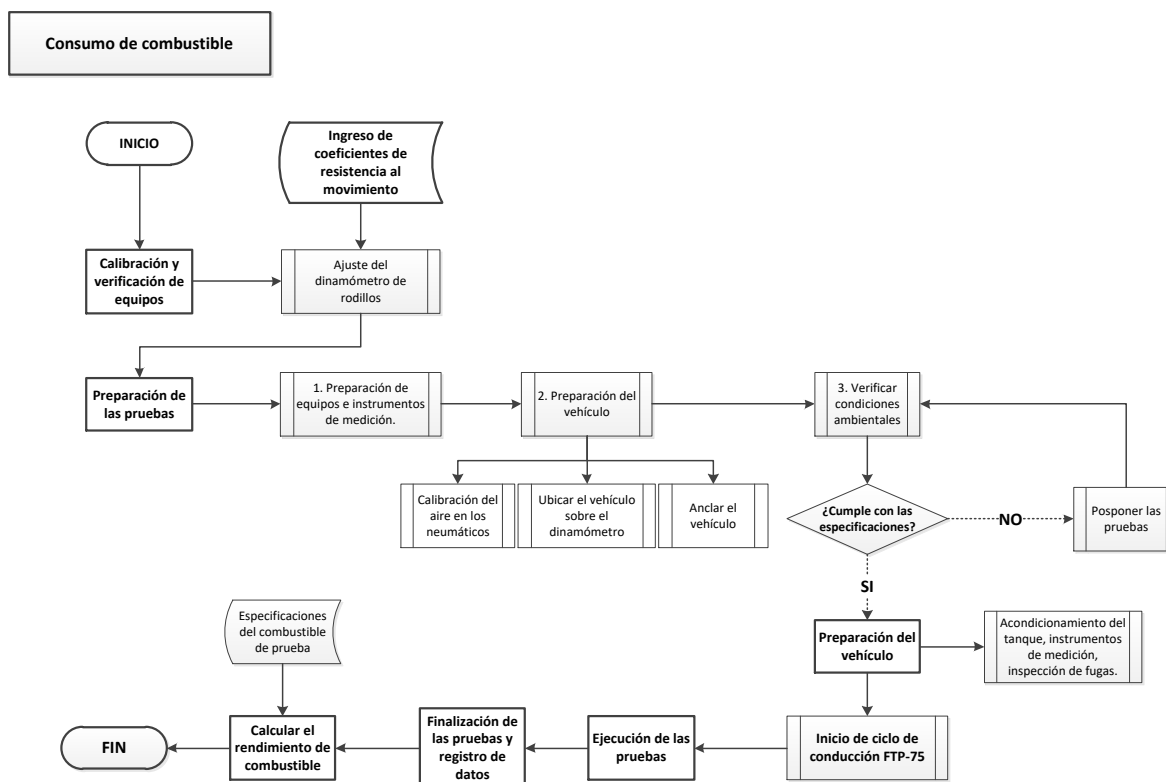
**Figura 12.** Protocolo para ejecutar pruebas de *Coast Down* en laboratorio.

Finalmente, para las pruebas de consumo de combustible los coeficientes aerodinámicos y de rodadura obtenidos en las pruebas de ruta son introducidos en el dinamómetro de rodillos en complemento del ciclo de prueba FTP-75, con el fin de generar resultados más cercanos a la realidad.

### 3.4.2. Medición de consumo de combustible en laboratorio

El método gravimétrico, consiste en medir la cantidad de masa de combustible, antes de iniciar y una vez finalizado el ciclo de conducción, de esta forma conociendo la distancia recorrida, se puede calcular el consumo o el rendimiento del vehículo, según su finalidad. Adicionalmente, este método permite contabilizar el consumo en cualquier instante de tiempo, siendo ventajoso ya que se puede realizar un seguimiento centralizado de una sola variable y no es necesario tener en cuenta los resultados de emisiones del ciclo efectuado.

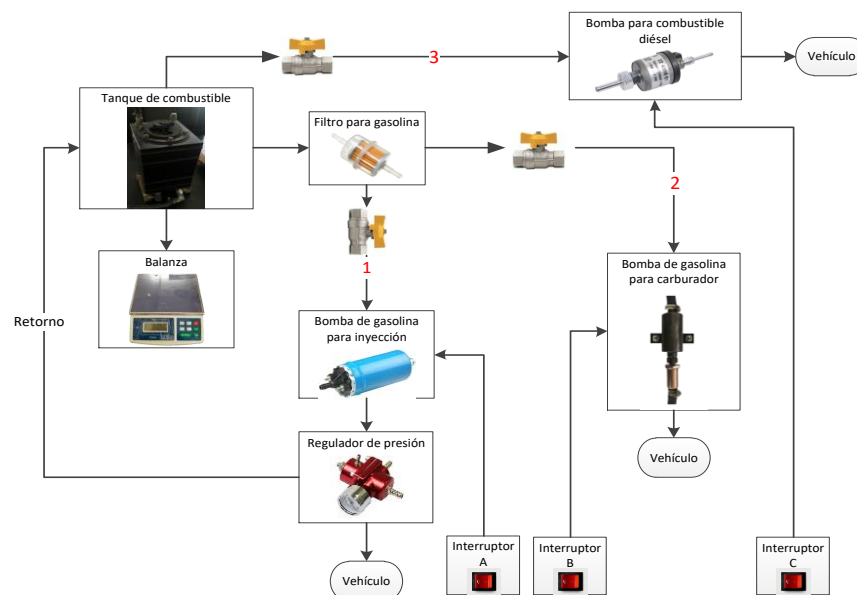
Para la comparación con el etiquetado energético habitualmente los resultados de los ensayos se expresan en forma de rendimiento [km/l], sin embargo, las personas particulares mencionan el consumo de combustible [l/100km], puesto que lo relaciona más fácil con el consumo de energía. La Figura 13, presenta el protocolo de pruebas para ejecutar el ensayo de consumo de combustible en laboratorio considerando los coeficientes de resistencia al movimiento obtenidos durante las pruebas de *Coast Down* en ruta [73], [78]:



**Figura 13.** Protocolo de pruebas de consumo de combustible en laboratorio.

### • Módulo de combustible en laboratorio

Para poder contabilizar la masa de combustible consumida durante el ciclo, se implementa un módulo de combustible adaptable a vehículos que emplean gasolina en modo inyección o carburador y para vehículos que emplean diésel como combustible, por las líneas 1, 2 y 3 respectivamente, tal como lo ilustra la Figura 14. En particular, para la línea de vehículos a gasolina en modo inyección se cuenta con una balanza, un tanque externo de combustible, un filtro de combustible, una bomba de combustible exterior, un regulador de presión y un sistema de retorno al tanque externo. Este montaje va conectado a la línea de alimentación de combustible del vehículo mediante un acople rápido.



**Figura 14.** Módulo de combustible para pruebas de laboratorio.

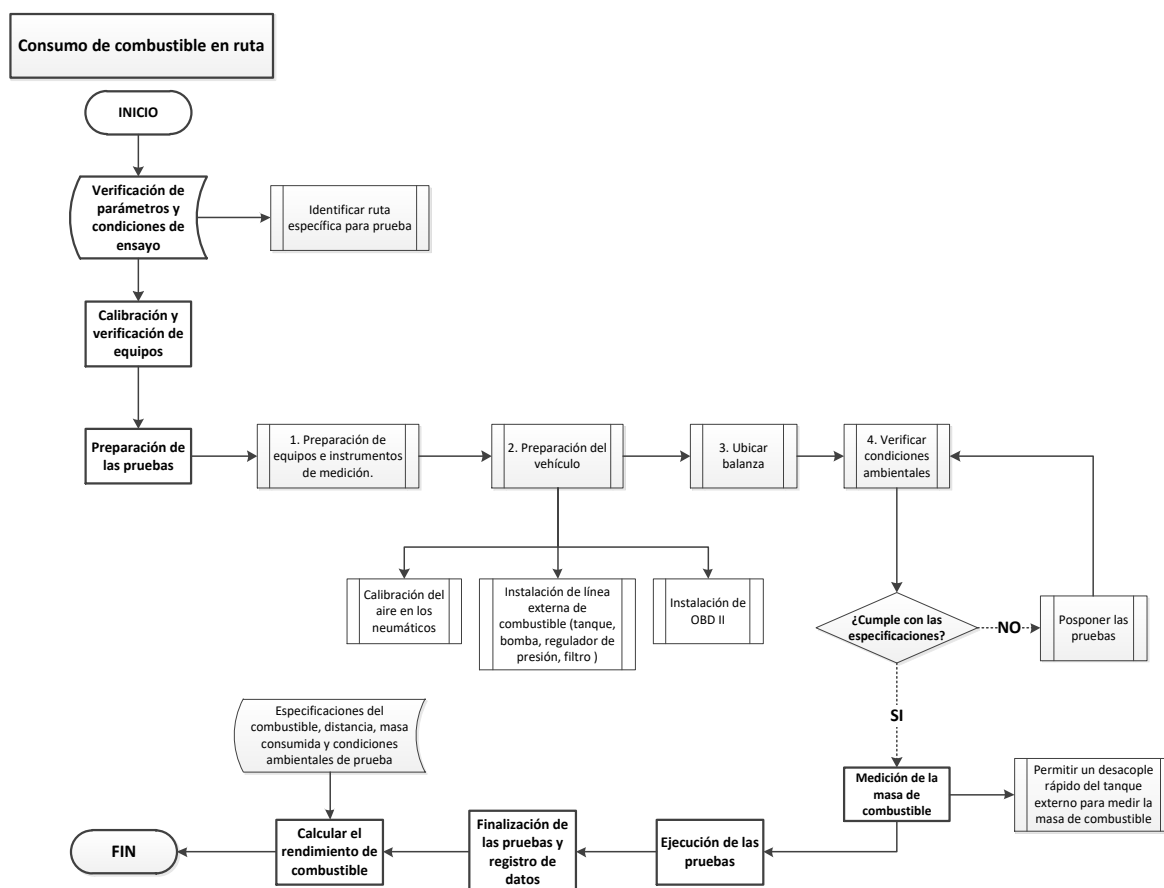
La Figura 15 presenta el vehículo de pruebas montado en el dinamómetro de rodillos del Laboratorio de Pruebas Dinámicas Automotrices, la pantalla para seguir el ciclo de conducción, el módulo de combustible acoplado al vehículo, y el ventilador centrífugo para simular la refrigeración del motor durante la prueba.



**Figura 15.** Montaje de prueba de consumo de combustible en laboratorio.

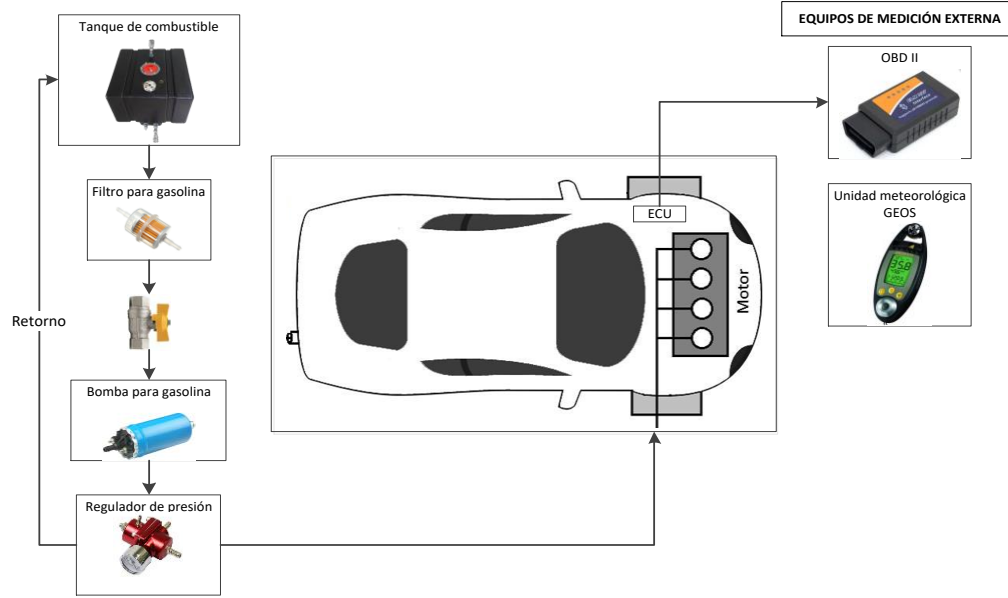
### 3.4.3. Metodología para la medición de consumo de combustible en ruta

La evaluación de los factores humanos asociados a la conducción generalmente es realizada en ruta, puesto que se consideran variables como tráfico, infraestructura e imprevistos del lugar de pruebas, los cuales influyen directamente en el consumo de combustible. Por lo tanto, en vista de que existen estrategias de eficiencia energética que se deben analizar en ruta, se desarrolló un protocolo de pruebas, basados en el método gravimétrico [73], [78]. La Figura 16, presenta el protocolo de consumo de combustible en ruta:



**Figura 16.** Protocolo de pruebas de consumo de combustible en ruta.

Adicionalmente, se debe implementar el módulo de combustible para pruebas de laboratorio en la parte posterior del vehículo, tal como se muestra en la Figura 17. La medición de las condiciones ambientales (presión, temperatura y humedad relativa) se realizó con una unidad meteorológica GEOS, la densidad del combustible con un densímetro de gasolina, la masa de combustible con una balanza externa y se utilizó un sistema de diagnóstico a bordo del vehículo OBD-II, para medir segundo a segundo la distancia durante el recorrido.



**Figura 17.** Sistema externo para alimentación del motor en pruebas de ruta.

#### 3.4.4. Modelo de cálculo

El proceso de cálculo para determinar los coeficientes de resistencia al movimiento, así como el consumo y el rendimiento de combustible se presentan a continuación. Cabe destacar que las ecuaciones de rendimiento de combustible en laboratorio y ruta son una propuesta realizada para el método gravimétrico y fueron desarrolladas con base en los instrumentos y equipos presentes en el laboratorio, con base en las recomendaciones del Instituto Nacional de Metrología en Colombia.

Tal como se muestra en la ec.(1), la fuerza de arrastre global  $F(v)$  considera contribuciones de arrastre mecánico y aerodinámico que se manifiestan como fuerzas de oposición [79]:

$$F(v) = F_M + F_A \quad (1)$$

donde,

$F_M$ : fuerza del arrastre mecánico [N],

$F_A$ : fuerza del arrastre aerodinámico [N].

Las fuerzas de oposición al movimiento son obtenidas a partir de curvas de desaceleración construidas con los datos experimentales registrados durante la ejecución de los ensayos. Estas fuerzas son modeladas analíticamente mediante la ec. (2) [79]:

$$F(v) = \overbrace{\hat{f}_0 + \hat{f}_1 v}^{\text{arrastre mecánico}} + \overbrace{\hat{f}_2 v^2}^{\text{arrastre aerodinámico}} \quad (2)$$

donde,

$f_0$ : coeficiente de resistencia a la rodadura [N].

$f_1$ : coeficiente de resistencia por pérdidas internas en el tren motriz (Fricción sólido – sólido e inercia) [N·s/m].

$f_2$ : coeficiente de resistencia por arrastre aerodinámico [N·s<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>].

$v$ : velocidad [m/s].

La fuerza total de oposición se calcula mediante la suma de las fuerzas que restringen el movimiento a una determinada velocidad y se representa mediante la ec. (3) [79]:

$$F(v) = \overbrace{F_I + F_{RR} + F_{int} + F_g}^{\text{arrastre mecánico}} + \overbrace{\widetilde{F}_D}^{\text{arrastre aerodinámico}} \quad (3)$$

donde, el cálculo de las fuerzas restrictivas se realiza como se especifica en la Tabla 7.

**Tabla 7.** Fuerzas de resistencia al movimiento.

Fuerza	Símbolo	Expresión
Resistencia inercial	$F_I$	$F_I = m_v \frac{dv}{dt}$
Resistencia aerodinámica	$F_D$	$F_D = \frac{1}{2} \rho A C_D v^2$
Resistencia por empuje gravitacional	$F_g$	$F_g = m_v g \sin(\theta)$
Resistencia a la rodadura	$F_{RR}$	$F_{RR} = C_{RR} m_e g \cos \theta$
Resistencia mecánica	$F_{int}$	$F_{int} = C m_e v$

donde,

$m_v$ : masa del vehículo

$v$ : velocidad del vehículo

$\rho$ : densidad del aire

$m_e$ : masa equivalente del vehículo

$A$ : área del vehículo en dirección al movimiento

$C$ : coeficiente de resistencia mecánica

$C_D$ : coeficiente de resistencia aerodinámica

$C_{RR}$ : coeficiente de resistencia a la rodadura

Dado que durante el ensayo de *Coast Down*, el vehículo se desacelera con la transmisión en neutro en una pista plana, el efecto de las fuerzas mecánicas internas del vehículo, la fuerza de inercia y el empuje gravitacional son nulos. Así, la fuerza de oposición al movimiento se representa mediante la ec. (4):

$$F(v) = F_{RR} + F_D \quad (4)$$

Por lo tanto, con base en la ec.(2) la fuerza resistiva  $F(v)$  es función de la velocidad, y puede representarse mediante la ec. (5):

$$F(v) = f_0 + f_2 v^2 \quad (5)$$

Los coeficientes de resistencia al movimiento por rodadura,  $f_0$ , y por arrastre aerodinámico,  $f_2$ , se deben corregir por temperatura y se obtienen a partir de las ec. (6) y ec. (7) [76]:

$$f_0 = f'_0 [1 + k_T (T - T_0)] \quad (6)$$

siendo,

$f_0$ : coeficiente de resistencia a la rodadura corregido [N].

$f'_0$ : coeficiente de resistencia a la rodadura sin corrección [N].

$k_T$ : factor de corrección por temperatura, estimado en  $8,6 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ .

$T$ : temperatura ambiente en la pista en cada desaceleración [K].

$T_0$ : temperatura de referencia, igual a 293,15 K.

$$f_2 = \left( \frac{P_0 T}{P T_0} \right) (f'_2 - K_P f'_0) + K_P f_0 \quad (7)$$

siendo,

$f_2$ : coeficiente de resistencia aerodinámica corregido [ $\text{N}/(\text{m/s})^2$ ].

$f'_2$ : coeficiente de resistencia aerodinámica sin corrección [ $\text{N}/(\text{m/s})^2$ ].

$K_P$ : factor de corrección por presión barométrica, estimado en  $2,503 \times 10^{-4} (\text{m/s})^{-2}$ .

$P$ : presión atmosférica en la pista en cada desaceleración [kPa].

$P_0$ : presión de referencia, igual a 101,325 kPa.

Los coeficientes de resistencia a la rodadura  $f'_0$  y aerodinámica del vehículo  $f'_2$ , se calculan como el promedio de los coeficientes calculados para cada ensayo, como se expresa en las ec. (8) y ec. (9) [76]:

$$f'_0 = \sum_{k=1}^n \left( \frac{1}{n} \right) f'_{0,k} \quad (8)$$

$$f'_2 = \sum_{k=1}^n \left( \frac{1}{n} \right) f'_{2,k} \quad (9)$$

Los coeficientes  $f'_{0,k}$ ,  $f'_{2,k}$  son obtenidos a través de curvas experimentales modeladas para cada desaceleración, tal como se presenta en la Tabla 8. Así, estos coeficientes son calculados por medio de las ec. (10) y ec. (11) [76].

**Tabla 8.** Determinación de los coeficientes de resistencia al movimiento [76].

	$t$ [s]	$v$ [m/s]	$a$ [m/s <sup>2</sup> ]	$\bar{v}$ [m/s]	$\bar{v}^2$ [m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	$\bar{v}^4$ [m <sup>4</sup> /s <sup>4</sup> ]	$a\bar{v}^2$ [m <sup>3</sup> /s <sup>4</sup> ]
	$t_i$	$v_i$	$a_i = \frac{v_{i+1} - v_i}{\Delta t}$	$\bar{v} = \frac{v_{i+1} + v_i}{2}$	$\bar{v}_i^2$	$\bar{v}_i^4$	$a_i \bar{v}_i^2$
1	$t_1$	$v_1$	$a_1$	$\bar{v}_1$	$\bar{v}_1^2$	$\bar{v}_1^4$	$a_1 \bar{v}_1^2$
2	$t_2$	$v_2$	$a_2$	$\bar{v}_2$	$\bar{v}_2^2$	$\bar{v}_2^4$	$a_2 \bar{v}_2^2$
.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.
$n$	$t_n$	$v_n$	$a_n$	$\bar{v}_n$	$\bar{v}_n^2$	$\bar{v}_n^4$	$a_n \bar{v}_n^2$
			$\sum_{i=1}^n a_i$	$\sum_{i=1}^n \bar{v}_i$	$\sum_{i=1}^n \bar{v}_i^2$	$\sum_{i=1}^n \bar{v}_i^4$	$\sum_{i=1}^n a_i \bar{v}_i^2$

$$f'_{0,k} = \left[ -\frac{(\sum_{i=1}^n \bar{v}_i^4)(\sum_{i=1}^n a_i) - (\sum_{i=1}^n \bar{v}_i^2)(\sum_{i=1}^n a_i \bar{v}_i^2)}{(n-1) \sum_{i=1}^n \bar{v}_i^4 - (\sum_{i=1}^n \bar{v}_i^2)^2} \right] m_e \quad (10)$$

$$f'_{2,k} = \left[ -\frac{(n-1) \sum_{i=1}^n a_i \bar{v}_i^2 - (\sum_{i=1}^n \bar{v}_i^2)(\sum_{i=1}^n a_i)}{(n-1) \sum_{i=1}^n \bar{v}_i^4 - (\sum_{i=1}^n \bar{v}_i^2)^2} \right] m_e \quad (11)$$

Siendo  $k$  el número de ensayos y  $m_e$  la masa equivalente del vehículo, la cual, se calcula mediante la ec.(12):

$$m_e = m_v + m_{inst} + m_c + m_{Ir} \quad (12)$$

donde,

$m_v$ : masa del vehículo [kg].

$m_{inst}$ : masa de los equipos e instrumentos de medición [kg].

$m_c$ : masa de conductor y ocupantes [kg].

$m_{Ir}$ : masa equivalente a la inercia de rotación [kg].

La masa equivalente de inercia de rotación puede ser estimada como aproximadamente el 3% de la suma de la masa del vehículo, la masa de los equipos de medición y la masa de los ejecutantes, tal como se presenta en la ec. (13) [76]:

$$m_{Ir} = e_{\%}(m_v + m_{inst} + m_c) \quad (13)$$

$$e_{\%} = 0,03$$



Posteriormente, se calculan los coeficientes de variación  $CV_{f'_{0}}$ ,  $CV_{f'_{2}}$ , con el fin de establecer la variabilidad de los coeficientes de resistencia al movimiento  $f'_{0}$ ,  $f'_{2}$  respecto al valor de su media estimada  $\overline{f'_{0}}$ ,  $\overline{f'_{2}}$ , los cuales pueden calcularse mediante la ec. (14) [76]:

$$CV_{f'_{0}} = \frac{\sigma_{f'_{0}}}{\overline{f'_{0}}}, \quad CV_{f'_{2}} = \frac{\sigma_{f'_{2}}}{\overline{f'_{2}}} \quad (14)$$

$\sigma_{f'_{0}}$ : desviación estándar del coeficiente de resistencia a la rodadura [N].

$\sigma_{f'_{2}}$ : desviación estándar del coeficiente resistencia aerodinámica [N/(m/s)<sup>2</sup>].

Se debe considerar que el coeficiente de variación  $CV$  obtenido para los coeficientes  $f'_{0}$ ,  $f'_{2}$  debe ser menor al 10%.

El cálculo del rendimiento de combustible en laboratorio se realiza mediante de la ec. (15):

$$R = \frac{\pi \cdot N \cdot D \cdot \rho_{comb}}{m} \pm U(R) \quad (15)$$

siendo,

$R$ : rendimiento de combustible del vehículo [km/l].

$N$ : el número de vueltas dadas por el rodillo durante la prueba [-].

$D$ : es el diámetro de los rodillos [km].

$\rho_{comb}$ : es la densidad del combustible de prueba [kg/l].

$m$ : masa consumida de combustible [kg].

$U(R)$ : es la incertidumbre expandida asociada a la medición de las variables [km/l].

Por último, el cálculo del rendimiento de combustible en ruta se realiza mediante la ec. (16):

$$R = \frac{d \cdot \rho_{comb}}{m} \pm U(R) \quad (16)$$

siendo,

- $d$ : distancia recorrida en ruta por el vehículo [km].
- $\rho_{comb}$ : densidad del combustible de prueba [kg/l].
- $m$ : masa consumida de combustible [kg].
- $U(R)$ : incertidumbre expandida asociada a la medición de las variables [km/l].

El consumo de combustible es el recíproco del rendimiento, el cual puede ser calculado para las pruebas de laboratorio y ruta mediante la ec. (17):

$$C = \frac{100}{R} \quad (17)$$

donde,  $C$  es el consumo de combustible expresado en [l/100 km].

### 3.4.5. Modelo de estimación de incertidumbre para pruebas

En la mayoría de los casos un mensurando  $Y$  no se mide directamente, sino que se determina a partir de otras  $N$  magnitudes  $X_1, X_2, \dots, X_N$  mediante una relación funcional  $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N)$  como en el presente caso de estudio, el rendimiento de combustible  $R$  es función de la distancia, la densidad del combustible, la masa de combustible, entre otros [80]. Las magnitudes de entrada son consideradas como mensurandos que pueden depender de otras magnitudes junto con las correcciones y factores de corrección de los efectos sistemáticos. En el modelo analítico de rendimiento de combustible, no se identifica correlación entre las variables que lo definen, lo que significa que existe independencia entre ellas, por tanto, en la ec.(18) se presenta la varianza combinada del mensurando [80]:

$$u_c^2(y) = \sum_{j=1}^N \left[ \left( \frac{\partial Y}{\partial x_i} \right) u(x_i) \right]^2 + u_r^2 \quad (18)$$

donde,

$u_c^2(y)$ : varianza combinada,

$\frac{\partial Y}{\partial x_i}$ : coeficientes de sensibilidad,

$u(x_i)$ : incertidumbre estimada asociada a cada entrada  $x_i$ ,

$u_r^2$ : varianza estimada por repetibilidad,

$Y$ : mensurando, para el caso de estudio  $Y = R$  siendo este el rendimiento de combustible,

$y$ : rendimiento de combustible, asociado al modelo analítico.

La incertidumbre típica combinada  $u_c(y)$  es la raíz cuadrada de la varianza combinada  $u_c^2(y)$ , es una desviación que caracteriza la dispersión de los valores que podrían ser atribuidos al mensurando  $Y$ , y es igual a la suma de la varianza estimada asociada a la salida  $y$ . En otras palabras, la varianza combinada equivale a la suma del cuadrado de la incertidumbre estimada asociada a cada entrada  $x_i$ , multiplicado por el coeficiente de sensibilidad  $\left( \frac{\partial y}{\partial x_i} \right)$  para cada una de las entradas [80].

El cálculo del rendimiento de combustible  $R$  se obtiene introduciendo la incertidumbre expandida en el modelo analítico elaborado a partir de la identificación de las variables que influyen sobre su valor. Adicionalmente, debido a que los instrumentos de medición de estas variables introducen un error que se propaga hasta el valor del mensurando, es necesario contabilizar estas contribuciones con el fin de proporcionar un valor ajustado a los

requerimientos metrológicos establecidos, dando así lugar al modelo de estimación de la incertidumbre.

Este modelo permite incluir al valor del mensurando el error asociado al proceso de medición. A continuación, se presenta el modelo de incertidumbre de la medición del rendimiento o combustible vehicular en laboratorio y en ruta.

- **Incertidumbre del rendimiento de combustible en laboratorio**

La varianza combinada estimada para el rendimiento de combustible se da por la ec. (19):

$$u(R)^2 = \left(\frac{\partial R}{\partial N}\right)^2 u(N)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial D}\right)^2 u(D)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial \rho_{comb}}\right)^2 u(\rho_{comb})^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial m}\right)^2 u(m)^2 + u_r^2 \quad (19)$$

donde el intervalo de confianza se expresa mediante la ec. (20):

$$\bar{R} - U(R) \leq R \leq \bar{R} + U(R) \quad (20)$$

donde,  $U(R)$  es la incertidumbre expandida y es calculada mediante la ec. (21):

$$U(R) = k \cdot u(R) \quad (21)$$

Siendo  $k$  el factor de cobertura, que para este estudio se propuso como 2, estableciendo un nivel de confianza de aproximadamente 95%, considerando una distribución de probabilidad normal la cual se comprobará con los resultados de los ensayos y  $u(R)$  la incertidumbre combinada.

La incertidumbre asociada al número de vueltas del rodillo  $N$ , es calculada haciendo uso de la ec. (22):

$$u(N) = \sqrt{u(N)_{cal}^2 + u(N)_{res}^2} \quad (22)$$

siendo,

$u(N)_{cal}^2$ : varianza estimada asociada a la calibración del contador de vueltas digital.

$u(N)_{res}^2$ : varianza estimada asociada a la resolución del contador de vueltas digital.

La incertidumbre asociada al diámetro del rodillo  $D$ , se calcula mediante la ec. (23):

$$u(D) = \sqrt{u(D)_{cal}^2 + u(D)_{res}^2} \quad (23)$$

siendo,

$u(D)_{cal}^2$ : varianza estimada asociada a la calibración de la cinta pi de medición.

$u(D)_{res}^2$ : varianza estimada asociada a la resolución de la cinta pi de medición.

En la ec. (24), se presenta la incertidumbre por la densidad del combustible:

$$u(\rho_{comb}) = \sqrt{u(\rho_{comb})_{cal}^2 + u(\rho_{comb})_{res}^2} \quad (24)$$

siendo,

$u(\rho_{comb})_{cal}^2$ : varianza estimada asociada a la calibración del hidrómetro.

$u(\rho_{comb})_{res}^2$ : varianza estimada asociada a la resolución del hidrómetro.

En la ec. (25), se presenta la incertidumbre asociada a la masa de combustible:

$$u(m) = \sqrt{u(m)_{cal}^2 + u(m)_{res}^2} \quad (25)$$

siendo,

$u(m)_{cal}^2$ : varianza estimada asociada a la calibración de la balanza.

$u(m)_{res}^2$ : varianza estimada asociada a la resolución de la balanza.

La incertidumbre asociada a la repetibilidad  $u_r$  está dada por la ec. (26):

$$u_r = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} * \sum_{j=1}^n (R_i - \bar{R})^2} \quad (26)$$

donde,

$n$ : número de repeticiones.

$R_i$ : rendimiento de combustible para la  $i$ -ésima repetición.

$\bar{R}$ : rendimiento medio de combustible.

La incertidumbre por calibración de los instrumentos  $u_{c,i}$  se presenta en la ec. (27):

$$u_{c,i} = \frac{U_c}{k_c} \quad (27)$$

donde,

$U_c$ : incertidumbre expandida de calibración (Certificado de calibración).

$k_c$ : factor de cobertura por calibración.

La incertidumbre por resolución de los instrumentos análogos está dada por la ec. (28):

$$u_{ra,i} = \frac{r_a}{\sqrt{6}} \quad (28)$$

siendo,

$r_a$ : resolución del instrumento análogo.

La incertidumbre por resolución de los instrumentos digitales está dada por la ec. (29):

$$u_{rd,i} = \frac{r_d}{2\sqrt{3}} \quad (29)$$

siendo,

$r_d$ : resolución del instrumento digital.

Por último, los términos  $\frac{\partial y}{\partial x_i}$  representan los coeficientes de sensibilidad de cada una de las variables mensurables, tal como se muestra en la Tabla 9.

**Tabla 9.** Coeficientes de sensibilidad en pruebas de laboratorio.

Variable	Coeficientes de sensibilidad
$N$	$\frac{\partial R}{\partial N} = \frac{D \cdot \rho_{comb}}{m}$
$D$	$\frac{\partial R}{\partial D} = \frac{N \cdot \rho_{comb}}{m}$
$\rho_{comb}$	$\frac{\partial R}{\partial \rho_{comb}} = \frac{N \cdot D}{m}$
$m$	$\frac{\partial R}{\partial m} = \frac{(N \cdot D \cdot \rho_{comb})}{m^2}$

- **Incertidumbre del rendimiento de combustible en ruta**

La varianza combinada estimada para el rendimiento de combustible se da por la ec. (30):

$$u(R)^2 = \left(\frac{\partial R}{\partial d}\right)^2 u(d)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial m}\right)^2 u(m)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial \rho_{comb}}\right)^2 u(\rho_{comb})^2 + u_r^2 \quad (30)$$

donde, el intervalo de confianza se expresa mediante la ec. (31):

$$\bar{R} - U(R) \leq R \leq \bar{R} + U(R) \quad (31)$$

Las incertidumbres asociadas a las variables a tener en cuenta para el rendimiento de combustible en ruta se calculan tal como se realizó en las pruebas de laboratorio y los coeficientes de sensibilidad se calculan como se muestra en la Tabla 10.

**Tabla 10.** Coeficientes de sensibilidad en pruebas de ruta.

Variable	Coeficientes de sensibilidad
$d$	$\frac{\partial R}{\partial d} = \frac{\rho_{comb}}{m}$
$\rho_{comb}$	$\frac{\partial R}{\partial \rho_{comb}} = \frac{d}{m}$
$m$	$\frac{\partial R}{\partial m} = \frac{(d \cdot \rho_{comb})}{m^2}$

### 3.5. Implementación de la metodología en laboratorio

La implementación de la metodología se realizó sobre un vehículo con características representativas del parque automotor colombiano. Para ello, se clasificaron los vehículos que circulan por el territorio nacional según su clase y cilindrada, lo cual, permitió determinar que la mayoría de los vehículos en el parque automotor son automóviles, con una participación de casi un 60 %, tal como se muestra en la Tabla 11.

**Tabla 11.** Clasificación de vehículos por clase [81].

Clase	Cantidad	%
Automóvil	2546215	59,9
Camioneta	707838	16,6
Campero	556325	13,1
Camión	234761	5,5
Microbús	75420	1,8
Bus	64296	1,5
Buseta	37568	0,9
Motocarro	18737	0,4
Cuatrimoto	10848	0,3
Total	4252008	100

Posteriormente, los automóviles se clasificaron según el cilindraje de su motor. En la Tabla 12, se observa que los automóviles con un cilindraje menor a los 1800 cm<sup>3</sup>, dominan el mercado con una participación del 89%.

**Tabla 12.** Cantidad de automóviles por cilindraje [81].

Cilindrada [cm <sup>3</sup> ]	Cantidad	%
<1800	2267178	89,0
1801-2500	236110	9,3
2500-3200	25077	1,0
3200-4600	13466	0,5
>4600	4377	0,2
Total	2546208	100

Con el fin de determinar la marca que sobresale en el mercado de automóviles con cilindraje inferior a 1800 cm<sup>3</sup>, se realiza una clasificación de esta tipología de vehículos según su marca. La Tabla 13 muestra que la marca Chevrolet presenta un predominio en el mercado vehicular colombiano, con una participación de 30,4%, seguido de Renault y Mazda, cuyos porcentajes de participación son 27,1 % y 10,5 % respectivamente.

**Tabla 13.** Principales marcas de vehículos con cilindraje menor a 1800 cm<sup>3</sup> [81].

Automóviles con cilindraje < 1800 cm <sup>3</sup>		
Marca	Cantidad	%
CHEVROLET	688933	30,4
RENAULT	614138	27,1
MAZDA	238061	10,5
HYUNDAI	186026	8,2
KIA	70059	3,1

Estos resultados permiten establecer que los automóviles marca Chevrolet con un cilindraje menor a 1800 cm<sup>3</sup>, son los vehículos más representativos del parque automotor en Colombia. Por este motivo se utilizó el vehículo Chevrolet Aveo modelo 2010 con un motor de 1600 cm<sup>3</sup>, en el cual se realizaron las pruebas.

Los resultados detallados de las pruebas de rendimiento de combustible y la estimación de la incertidumbre expandida obtenidos tras la implementación de la metodología en laboratorio se presentan en la Tabla 14.

**Tabla 14.** Ensayos de consumo de combustible en laboratorio.

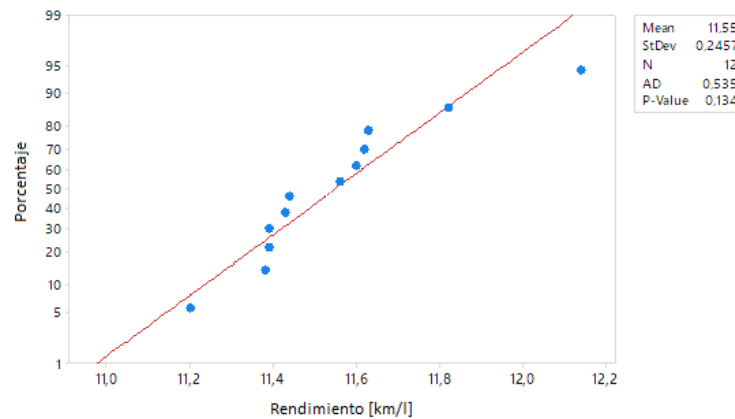
Ensayo	Masa consumida [kg]	Distancia [km]	Temperatura ambiente [°C]	Presión ambiente [hPa]	Humedad relativa [%]	Rendimiento [km/l]
1	1,086	16,872	22,8	856,3	68,5	11,39
2	1,022	16,828	24,7	854,2	60,1	12,14
3	1,053	16,915	23,7	852,7	69,5	11,82
4	1,112	16,910	23,9	855,4	57,4	11,20
5	1,078	17,002	20,8	856,6	65,5	11,62
6	1,082	16,833	24,1	855,8	62	11,44
7	1,092	16,894	26,1	852,6	58,1	11,38
8	1,093	16,991	23,6	854,3	67,7	11,43
9	1,073	16,931	25,4	853,8	62,2	11,60
10	1,081	17,118	25,4	850,3	64,3	11,63
11	1,093	16,969	24,9	849,8	63,9	11,39
12	1,087	17,093	23,8	854,4	69,6	11,56
Incertidumbre expandida				0,1410		
Rango de rendimiento				$11,40 \leq R \text{ [km/l]} \leq 11,69$		

Se realiza un análisis de la distribución de los datos obtenidos en los ensayos, con el fin de determinar si poseen una tendencia asociada a una distribución normal. Por lo tanto, se plantean dos hipótesis:

- **Hipótesis nula:** los datos, son una muestra aleatoria de tamaño  $n$  de una distribución normal.
- **Hipótesis alternativa:** los datos, son una muestra aleatoria de una distribución de probabilidades diferente.

Si se da aceptación a la hipótesis nula, la distribución de datos se considera normal. En la Figura 18, se muestra la distribución en escala logarítmica de los resultados de la prueba de normalidad *Anderson – Darling* llevada a cabo en MiniTab.





**Figura 18.** Prueba de normalidad Anderson-Darling.

De la prueba de normalidad se obtiene un valor probabilístico  $P=0,134$ , dado que para  $P>0,1$  no existe evidencia para rechazar la hipótesis nula, se infiere que los datos poseen una tendencia asociada a una distribución normal. Con base en lo anterior, se acepta la hipótesis nula, lo cual a su vez permite aceptar el modelo de cálculo del rendimiento de combustible propuesto, considerando el tamaño de muestra utilizado para las pruebas. En consecuencia, es acertado seleccionar un nivel de confiabilidad del 95% [82].

Por último, realizando una comparación de los resultados, se identifica que la etiqueta energética del vehículo Chevrolet Aveo modelo 2010 con motor de 1600 cm<sup>3</sup> del Departamento de Energía de los Estados Unidos mostrada en la Figura 19, presenta un rendimiento de 27 MPG bajo el ciclo FTP-75, valor equivalente a 11,479 km/l. Esto muestra una diferencia de 0,07 km/l, respecto a la media del rendimiento calculado en el presente trabajo, por lo tanto, se infiere que el modelo matemático se ajusta a los estándares internacionales y que la metodología de pruebas es repetible y reproducible [83].



**Figura 19.** Etiquetado energético vehicular de Estados Unidos.

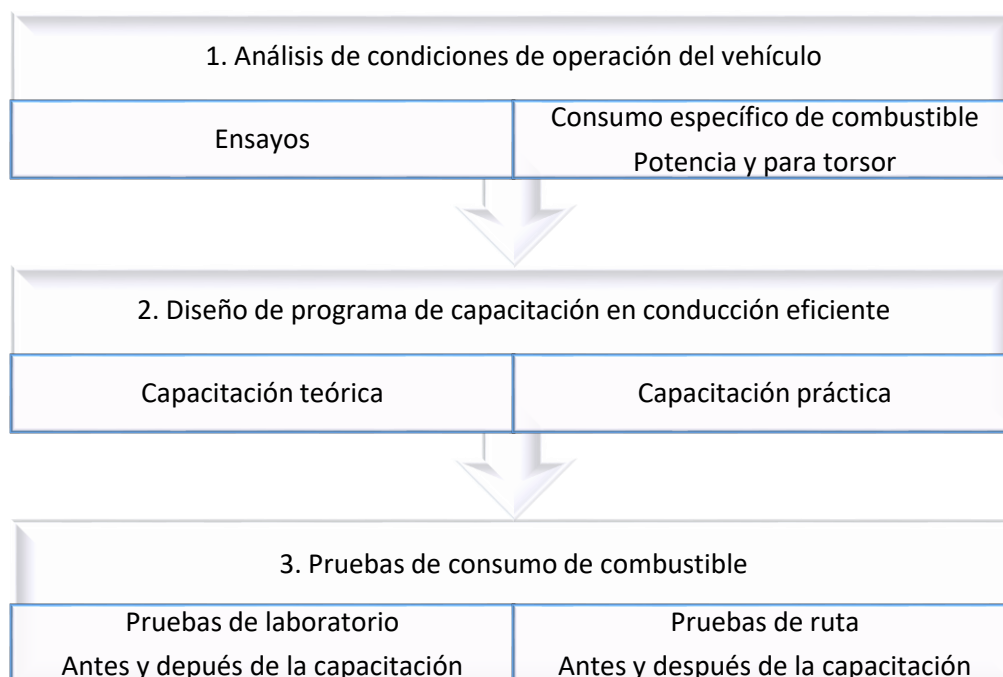
## CAPITULO IV

### 4. RESULTADOS IMPLEMENTACIÓN DE LA CONDUCCIÓN EFICIENTE

En este capítulo se presenta la implementación de la conducción eficiente como estrategia de eficiencia energética, se identifica el potencial de mejora mediante pruebas de laboratorio y se realiza pruebas de campo con el fin de introducir la influencia de la topografía y el tráfico en los resultados. Por último, se realiza un análisis comparativo del consumo de energía, el impacto económico y la posible reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>.

#### 4.1. Implementación de una estrategia de eficiencia energética

En la búsqueda de la reducción del consumo de combustible de los vehículos livianos, se planteó implementar la conducción eficiente, con el fin de determinar el potencial de mejora en el rendimiento de combustible mediante pruebas de laboratorio y evaluar el impacto reflejado al implementar conducción eficiente en un vehículo liviano en la ciudad de Pereira. Por lo tanto, para abordar la estrategia y realizar los ensayos se ejecutó el procedimiento ilustrado en la Figura 20.



**Figura 20.** Procedimiento para la evaluación de la conducción eficiente.

A continuación, se describe en detalle el procedimiento realizado para la ejecución de las pruebas.

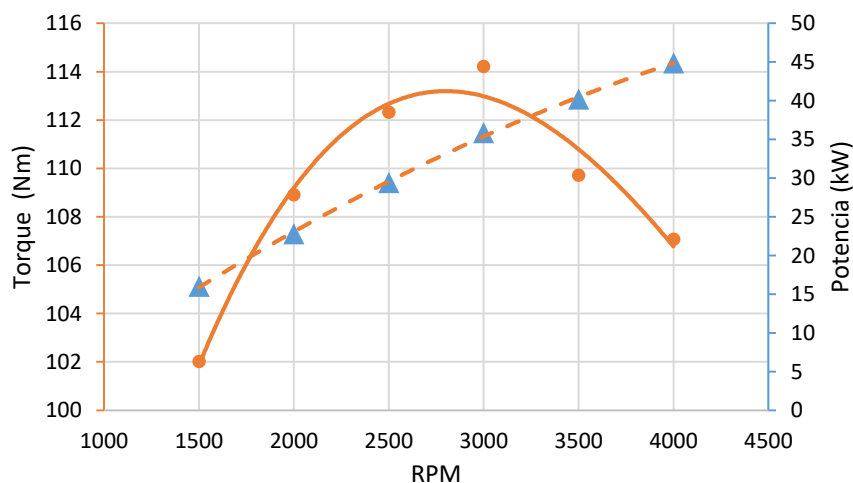
#### 4.1.1. Determinación de las condiciones de operación del vehículo

Para efectuar una conducción eficiente es importante conocer la situación actual de operación del vehículo, en este sentido haciendo uso del equipo dinamómetro de chasis – Dynapack 2000 del Laboratorio de Pruebas Dinámicas Automotrices y considerando los lineamientos de la norma SAE J1349, se realizaron pruebas de potencia, par torsor y consumo específico de combustible del vehículo a diferentes regímenes de revolución, empezando en 1500 RPM e incrementando 500 RPM hasta llegar a 4000 RPM, puesto que revoluciones por encima de estas pueden generar sobrecalentamientos en el vehículo y perjudicar los equipos. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 15, los cuales son el promedio de las repeticiones realizadas durante el ensayo.

**Tabla 15.** Resultado de pruebas de par, potencia y consumo específico.

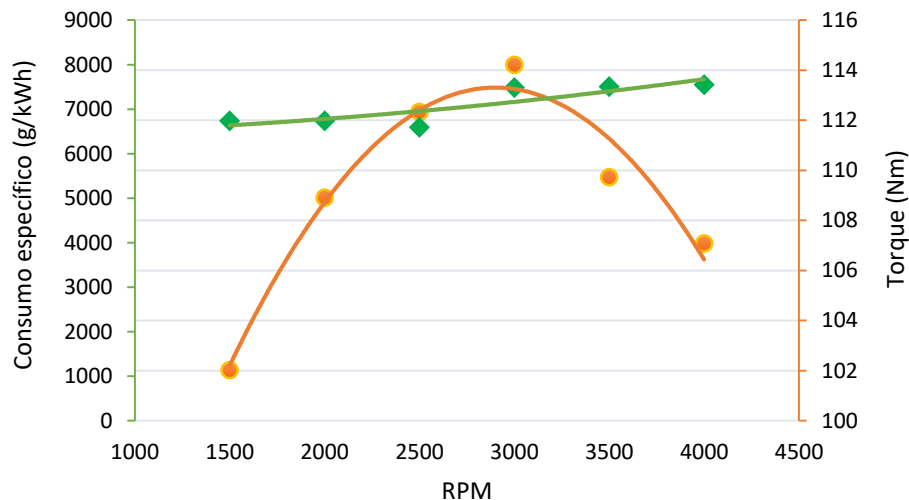
Revoluciones (RPM)	Potencia (kW)	Par torsor (Nm)	Consumo específico (g/kWh)
1500	16,02	102,02	6739,87
2000	22,08	108,91	6736,20
2500	29,41	112,33	6593,46
3000	35,87	114,22	7486,13
3500	40,23	109,73	7507,42
4000	44,87	107,08	7550,05

En los datos obtenidos, se puede identificar que el par máximo del vehículo es de 114,22 Nm y se presenta a 3000 RPM, de igual manera se tiene que la potencia máxima alcanzada es de 44,87 kW en 4000 RPM. Las Figura 21 y Figura 22 presentan la relación entre el consumo específico de combustible, el torque y la potencia del vehículo.



**Figura 21.** Pruebas de Torque Vs Potencia.

En la Figura 21, se puede observar que a partir de 3000 RPM el torque empieza a disminuir progresivamente, por lo tanto, se identifica que el rango de mayor torque del vehículo se puede obtener entre los 2500 RPM y 3000 RPM, lugar en el que los cambios de marcha deberían realizarse si la intención es aprovechar la fuerza máxima del vehículo, puesto que la potencia permitiría que el motor se adapte con base en el régimen de giro según el lugar de operación lo requiera.



**Figura 22.** Pruebas de Consumo Específico Vs Torque.

Por otro lado, en la Figura 22 se evidencia que el vehículo a 2500 RPM presenta condiciones de operación de consumo específico mínimo con un par cercano al máximo y que a revoluciones mayores a esta, el consumo aumenta evidenciando que para inducir un menor consumo de combustible es importante conducir a revoluciones bajas.

Por lo tanto, con base en los resultados mencionados y dando un sustento práctico a la teoría de las fuentes bibliográficas consultadas [50], [84], se infiere que para obtener una conducción eficiente en un vehículo liviano tipo automóvil con un motor de 1600 cm<sup>3</sup> del sector transporte por carretera, se debe operar en un rango de revoluciones de 2000 RPM a 2500 RPM, de esta forma obtener un consumo específico mínimo de combustible y para aprovechar su fuerza máxima sin influir en un alto consumo de combustible los cambios de marcha deben realizarse a máximo 2500 RPM.

#### 4.1.2. Resultados pruebas de laboratorio

Las pruebas de laboratorio se realizaron con la participación de dos conductores, los cuales siguieron el ciclo de conducción en cada prueba, puesto que para la correcta ejecución de estos se requiere personal capacitado y experimentado. Inicialmente, se realizaron pruebas de consumo implementando los cambios de marcha en el ciclo FTP-75, tal como lo especifica la norma NBR 6601 para vehículos de caja de cambios mecánica [78]. Los resultados se presentan en la Tabla 16.

**Tabla 16.** Ensayos de consumo de combustible en laboratorio.

Ensayo	Masa consumida [kg]	Distancia [km]	Temperatura ambiente [°C]	Presión ambiente [hPa]	Humedad relativa [%]	Rendimiento [km/l]
1	1,086	16,872	22,8	856,3	68,5	11,39
2	1,022	16,828	24,7	854,2	60,1	12,14
3	1,053	16,915	23,7	852,7	69,5	11,82
4	1,112	16,910	23,9	855,4	57,4	11,20
5	1,078	17,002	20,8	856,6	65,5	11,62
6	1,082	16,833	24,1	855,8	62	11,44
7	1,092	16,894	26,1	852,6	58,1	11,38
8	1,093	16,991	23,6	854,3	67,7	11,43
9	1,073	16,931	25,4	853,8	62,2	11,60
10	1,081	17,118	25,4	850,3	64,3	11,63
11	1,093	16,969	24,9	849,8	63,9	11,39
12	1,087	17,093	23,8	854,4	69,6	11,56
Incertidumbre expandida				0,1409		
Rango de rendimiento [km/l]				$11,408 \leq R \leq 11,690$		

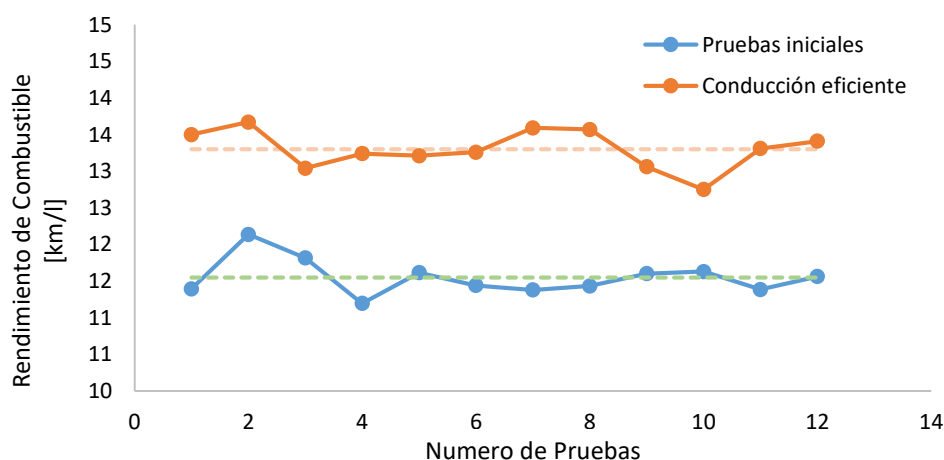
Posteriormente, se analizó el comportamiento de velocidad y los datos de revoluciones segundo a segundo obtenidos por el OBDII durante la ejecución del ciclo de conducción. De esta forma, con base en las revoluciones que presentaba el vehículo durante el desarrollo de la prueba, se identificó el instante para modificar los cambios sugeridos por la norma en el ciclo FTP-75 e implementar los nuevos puntos que permitan obtener un consumo mínimo de combustible, siguiendo los resultados de las pruebas de consumo específico y torquer realizadas con anticipación.

Por último, se realiza la implementación de los nuevos puntos de cambio de marchas en el ciclo de conducción FTP 75, y se ejecutan las pruebas de consumo de combustible para evaluar las mejoras en el rendimiento al implementar marchas altas. La Tabla 17, presenta los resultados obtenidos tras la implementación de la estrategia de conducción eficiente.

**Tabla 17.** Ensayos de conducción eficiente en laboratorio.

Ensayo	Masa consumida [kg]	Numero de vueltas rodillo	Temperatura ambiente [°C]	Presión ambiente [hPa]	Humedad relativa [%]	Rendimiento [km/l]
1	0,925	24914	24,1	855,7	67,9	13,50
2	0,915	24991	27,9	852,5	57,3	13,67
3	0,947	24722	25,5	852,5	68,7	13,04
4	0,940	24848	20,3	851,4	79,1	13,24
5	0,940	24821	23,6	856,8	70,1	13,21
6	0,933	24767	25,4	856,4	65,3	13,26
7	0,924	25053	26,5	853,9	59,3	13,59
8	0,914	24851	27,3	853,0	61,5	13,57
9	0,952	24902	20,6	856,0	77,9	13,06
10	0,962	24584	24	856,2	67,7	12,75
11	0,939	24994	23,5	854,0	64,2	13,31
12	0,927	24823	26,1	852,8	59,2	13,41
Incertidumbre expandida				0,1548		
Rango de rendimiento [km/l]				$13,15 \leq R \leq 13,46$		

La Figura 23, presenta la comparación del rendimiento del vehículo, identificando una posible reducción del 15 % en el consumo de combustible respecto al valor promedio tras la implementación de la conducción eficiente.

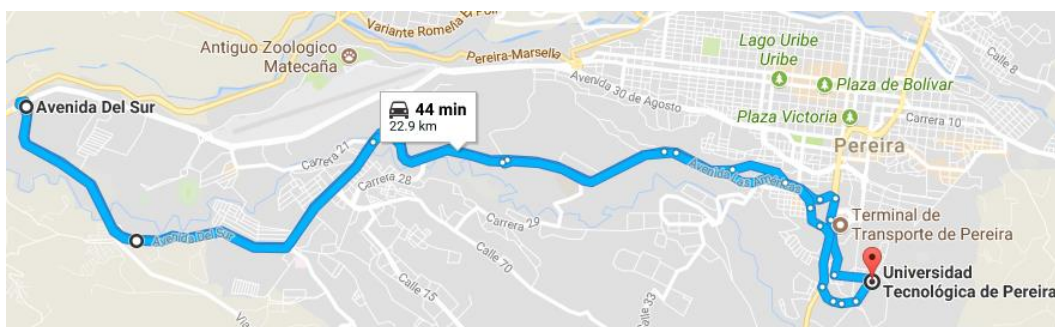


**Figura 23.** Comparación del rendimiento de combustible.

Una vez identificado el potencial de aumento del rendimiento en laboratorio, se procede a realizar las pruebas de ruta, con el fin de determinar el porcentaje de reducción del consumo en la operación real de un vehículo liviano en la ciudad de Pereira.

### 4.1.3. Resultados pruebas en ruta

Las pruebas de laboratorio permiten identificar un potencial de aumento del rendimiento al implementar conducción eficiente, sin embargo, en ruta se presentan condiciones de tráfico y pendientes positivas o negativas que pueden influir directamente sobre los valores de eficiencia encontrados. Por lo tanto, se identificó una vía representativa para la ciudad de Pereira, teniendo en cuenta las rutas estudiadas para la generación del ciclo de conducción del área metropolitana centro occidente, con una modificación debida a la necesidad de medición de masa de combustible en el laboratorio y a los cambios en la infraestructura vial de la ciudad [85]. Esta, inicia desde el Laboratorio de Pruebas Dinámicas Automotrices de la Universidad Tecnológica de Pereira, pasando por la calle 17 rumbo al terminal de transporte, siguiendo por la avenida Las Américas en el tramo comprendido entre el Museo de Arte y Mercasa, se realiza el retorno por la rotonda vía Cartago-Manizales, se devuelve por el mismo tramo, hasta llegar al Centro Comercial la 14, en donde se escoge la vía Armenia y se cruza hacia el túnel de la calle 15, el cual comunica esta vía con el bloque 15 de la Universidad, tal como se ilustra en la Figura 24.



**Figura 24.** Ruta representativa para pruebas de conducción eficiente.

Los ensayos de rendimiento de combustible en ruta se realizaron con el apoyo de cuatro conductores (tres hombres y una mujer). De los cuales dos operaron en horas pico (7 - 8 am) (12 - 2 pm) y tres en horas valle (8 -12 am) (2 a 6 pm) de manera aleatoria, con el fin de involucrar variables que influyen al operar el vehículo en ruta como son el conductor, la topografía de las carreteras y el tráfico.

Cada recorrido presenta una duración de aproximadamente 45 minutos y se ejecutaron siguiendo los requerimientos de condiciones ambientales de las normativas internacionales [73], [78]. Inicialmente, se realizaron pruebas antes de la capacitación de conducción eficiente, con el fin de determinar el rendimiento de combustible promedio que presenta un conductor en la ruta seleccionada, los registros obtenidos para cada ensayo se ilustran en la Tabla 18.

**Tabla 18.** Ensayos de consumo de combustible en ruta sin conducción eficiente.

Ensayo	Masa consumida [kg]	Densidad combustible [kg/m <sup>3</sup> ]	Distancia [km]	CONDICIONES AMBIENTALES			Volumen de combustible consumido [l]	Rendimiento de combustible [km/l]
				Tamb [°C]	P atm [hPa]	φ [%]		
1	1,60	733	22,30	21,1	857,2	74,9	2,18	10,21
2	1,49	733	22,32	21,9	857,2	72,1	2,03	10,98
3	1,60	733	22,32	21,1	857,4	73,6	2,18	10,22
4	1,48	733	22,28	22,1	856,9	74,9	2,01	11,03
5	1,51	733	22,30	23,6	853,9	72,5	2,06	10,82
6	1,48	733	21,97	21,2	855,2	70,6	2,01	10,88
7	1,51	733	22,30	22,3	854,4	70,2	2,06	10,82
8	1,48	728	22,24	29,5	850,3	46	2,03	10,93
9	1,44	730	22,30	26,1	850,7	61,5	1,97	11,30
10	1,62	734	22,30	20,5	856,1	79,8	2,20	10,10
11	1,44	733	22,30	22,7	856	73,4	1,96	11,35
12	1,47	732	22,30	31	849,7	48,3	2	11,10
13	1,58	735	22,32	18,1	855,5	79,3	2,14	10,38
14	1,59	735	22,36	25	855,8	67,7	2,16	10,34
15	1,48	735	22,34	19,1	856,0	81,3	2,01	11,09
16	1,48	735	22,38	23,3	856,1	73,4	2,01	11,11
17	1,59	735	22,32	17,4	855,0	80,1	2,16	10,32
18	1,56	734	22,36	25,1	853,3	68,1	2,12	10,52
19	1,59	734	22,37	23,8	853,8	72,7	2,16	10,33
20	1,55	736	22,32	19,5	856,2	81	2,10	10,60

Se realizaron pruebas estadísticas de los resultados obtenidos con el fin de identificar si el método empleado para la medición del consumo de combustible en ruta, también se encuentra dentro de una distribución aceptable. Para ello, se empleó el coeficiente de variación CV, o desviación estándar relativa (RDS), el cual relaciona la desviación estándar con el promedio de la totalidad de las lecturas, tal como se presenta en la ec.(32) [86].



$$\%CV = \frac{S}{\bar{X}} * 100 \quad \text{Ec.(32)}$$

donde,

: es la desviación estándar de las lecturas.

: es el promedio de la totalidad de las lecturas.

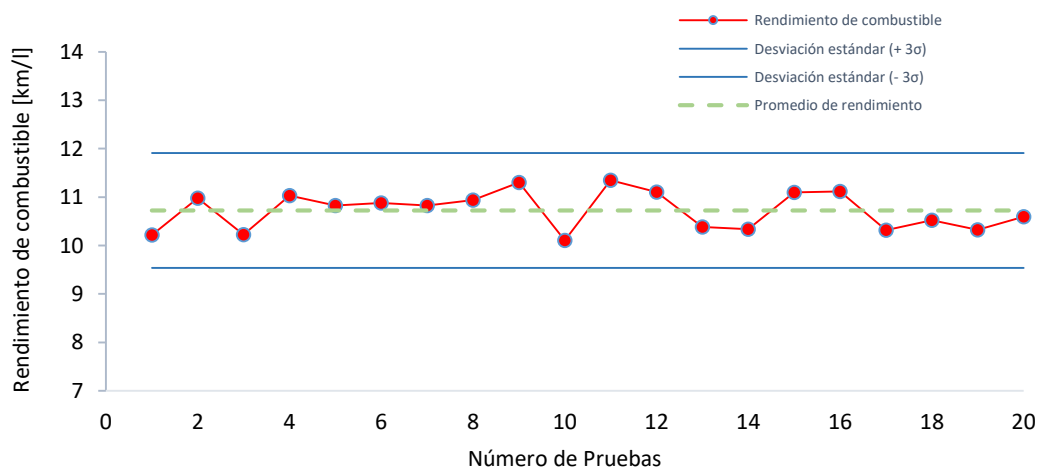
Un coeficiente de variación menor al 10%, valida los resultados obtenidos en las pruebas ejecutadas [76].

La Tabla 19, presenta los resultados promedios del volumen y el rendimiento del vehículo, así como la incertidumbre de la medición, el coeficiente de variación obtenido y el rango de consumo de combustible en ruta.

**Tabla 19.** Análisis de datos obtenidos en pruebas de ruta sin conducción eficiente.

Promedio	Volumen de combustible consumido [l]	Rendimiento de combustible [km/l]
	2,082	10,72
Desviación Estándar [ $\sigma$ ]	0,39	
CV [%]	3,681	
U(R)	km/l	
RENDIMIENTO DE COMBUSTIBLE [km/l]		
10,594 ≤ R ≤ 10,854		

Se puede observar que los datos obtenidos cumplen con el criterio de validez mencionado anteriormente, puesto que el coeficiente de variación es de 3,68%. La Figura 25, ilustra el comportamiento de los datos obtenidos durante los ensayos de campo respecto a la dispersión, el promedio de consumo de combustible y la desviación estándar.



**Figura 25.** Dispersión de datos en pruebas de ruta.

Se puede observar que los datos de rendimiento de combustible por prueba no varían significativamente respecto a su promedio, es decir que el estilo de conducción de los cuatro conductores es similar durante la ejecución del ensayo, manteniéndose por dentro de los criterios permitidos de la desviación estándar; 3 veces la desviación estándar por encima del promedio y menos 3 veces la desviación estándar por debajo del promedio, para una distribución normal de probabilidad.

Las pruebas de conducción eficiente como estrategia para la reducción del consumo de combustible en Pereira se realizaron siguiendo las mismas condiciones de horario, ruta y vehículo de las pruebas anteriores. Los conductores, después de una capacitación teórica en donde se dio a conocer las prácticas a seguir durante los recorridos y en constante monitoreo durante la ejecución de la prueba, desarrollaron los ensayos de manera aleatoria. La Tabla 20 presenta los registros de variables y resultados obtenidos para cada ensayo ejecutado.

**Tabla 20.** Ensayos de conducción eficiente en ruta.

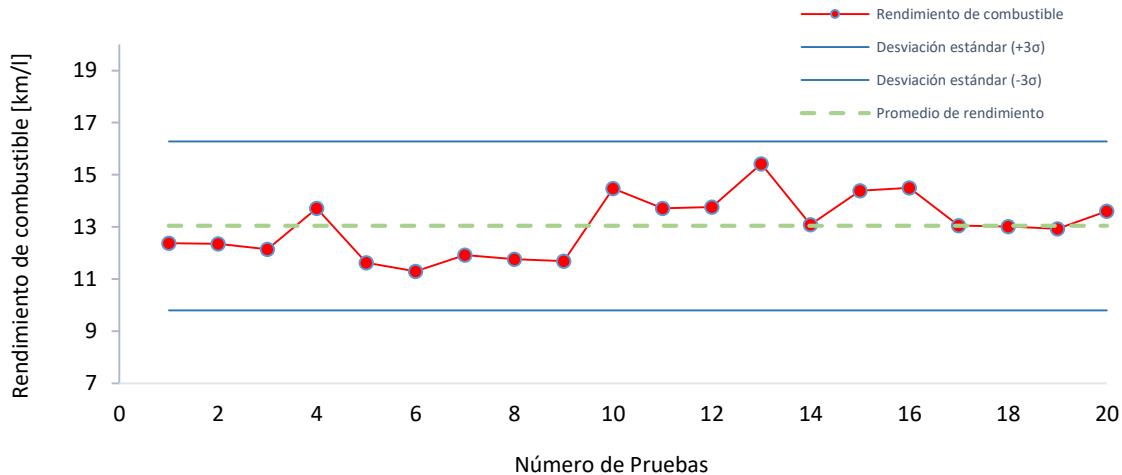
Ensayo	Masa consumida [kg]	Densidad combustible [kg/m <sup>3</sup> ]	Distancia [km]	CONDICIONES AMBIENTALES			Volumen de combustible consumido [l]	Rendimiento de combustible [km/l]
				Tamb [°C]	Patm [hPa]	φ [%]		
1	1,31	730	22,2	22,5	856,3	65	1,79	12,37
2	1,33	736	22,32	25	852,8	63,7	1,80	12,35
3	1,34	735	22,13	28,5	851,3	50,6	1,82	12,13
4	1,19	736	22,17	23	856,4	67,8	1,61	13,71
5	1,41	739	22,18	21,2	857,3	74,9	1,90	11,62
6	1,11	738	22,15	22,3	856,9	72,8	1,43	15,42
7	1,25	738	22,16	21,3	857,3	73,6	1,69	13,08
8	1,13	733	22,19	25,6	853,6	60,4	1,54	14,39
9	1,13	739	22,18	21	857,8	76,2	1,52	14,50
10	1,13	738	22,16	23,7	856,6	70,5	1,53	14,47
11	1,19	737	22,15	27	853,2	56,6	1,61	13,71
12	1,19	740	22,13	24,2	856,8	68,2	1,60	13,76
13	1,46	736	22,40	24	855,6	71,8	1,98	11,29
14	1,38	735	22,39	19,3	854,6	80,6	1,87	11,93
15	1,40	736	22,38	22,8	854,5	76,6	1,90	11,77
16	1,40	736	22,26	25,2	851,6	59,4	1,90	11,69
17	1,26	736	22,35	18,6	854,8	80,6	1,71	13,06
18	1,26	734	22,35	24,1	854,1	69,5	1,71	13,02
19	1,27	736	22,32	19,4	854,9	79,1	1,72	12,94
20	1,21	736	22,36	20,8	855,3	78,5	1,64	13,60

El análisis estadístico para la validación de los resultados obtenidos en las pruebas de conducción eficiente en ruta se presenta en la Tabla 21. En este se identifica que, aunque la desviación estándar de las pruebas aumentó con respecto a las realizadas sin la implementación de la estrategia, el criterio de validez sigue estando dentro del rango de confiabilidad, puesto que el coeficiente de variación es de 8,29%.

**Tabla 21.** Análisis de la conducción eficiente en pruebas de ruta.

Promedio	Volumen de combustible consumido [l]	Rendimiento de combustible [km/l]
	1,722	13,01
Desviación Estándar [σ]	1,08	
CV [%]	8,29	
U(R)	km/l	
RENDIMIENTO DE COMBUSTIBLE [km/l]		
12,845 ≤ R ≤ 13,1681		

En la Figura 26 se puede observar que los datos se mantienen por dentro de los criterios permitidos de la desviación estándar; 3 veces la desviación estándar por encima del promedio y menos 3 veces la desviación estándar por debajo del promedio, para una distribución normal de probabilidad.



**Figura 26.** Dispersión de datos en pruebas de conducción eficiente en ruta.

Igualmente se observa que la conducción eficiente trabaja de manera progresiva en reducción del consumo de combustible, puesto que a medida que los conductores practicaban las técnicas ejecutaban las recomendaciones con mayor facilidad y el rendimiento del vehículo aumentaba.

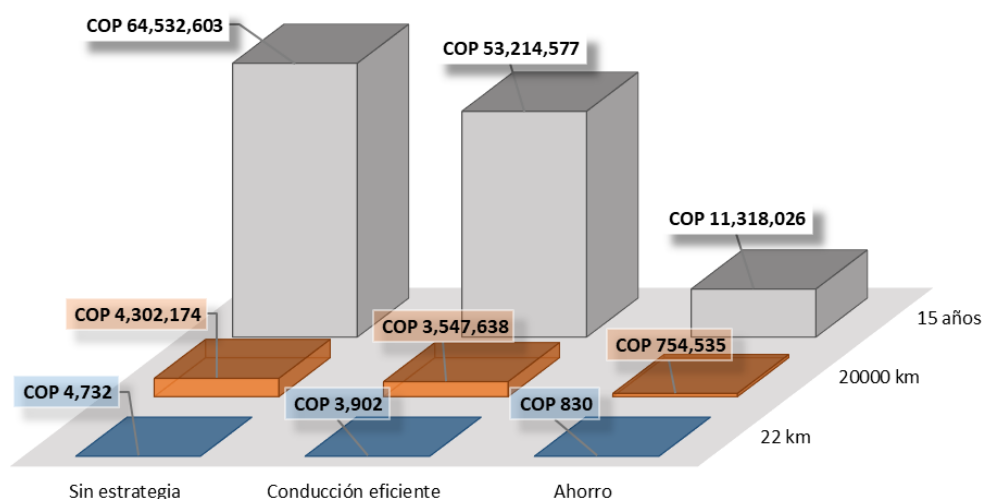
#### 4.2. Análisis de la conducción eficiente en la ciudad de Pereira

Con base en los resultados se puede determinar que la conducción eficiente es una estrategia viable para la reducción del consumo de combustible en los vehículos livianos, lo cual, se ve reflejado directamente en la disminución del costo del transporte por recorrido y en el ahorro de dinero general en la vida útil del vehículo. La Tabla 22 presenta el análisis comparativo del rendimiento de combustible y el porcentaje de ahorro obtenido tras la implementación de la conducción eficiente.

**Tabla 22.** Comparación en el consumo de combustible.

Rendimiento de combustible sin conducción eficiente [km/l]	
10,594 ≤ R ≤ 10,854	
Rendimiento de combustible aplicando conducción eficiente [km/l]	
12,845 ≤ R ≤ 13,1681	
<b>Aumento del rendimiento</b>	2,28 km/l
<b>Porcentaje de reducción de consumo</b>	21,2 %

Adicionalmente, la Figura 27 presenta el ahorro de dinero que una persona podría alcanzar al emplear técnicas de conducción eficiente, considerando el costo actual de la gasolina en Pereira, un recorrido diario de 22 kilómetros, los indicadores promedio de distancia recorrida anual y la vida útil de los vehículos.



**Figura 27.** Ahorro económico en la implementación de la conducción eficiente.

Se puede observar que la implementación de la conducción eficiente es rentable hasta en recorridos cortos, logrando ahorros de hasta 11 millones de pesos para una vida útil de 15 años, teniendo en cuenta las condiciones de operación del vehículo de pruebas y las horas de realización de los ensayos. La conducción eficiente no sólo presentó reducción en el consumo de combustible; los conductores identificaron una reducción del estrés y una mayor seguridad al conducir, puesto que podían observar con anticipación los posibles contratiempos y actuar sin tener que disipar energía en los frenados bruscos o paradas repentinas.

Adicionalmente, se realizó un cálculo teórico para la determinación de las emisiones de dióxido de carbono CO<sub>2</sub> presentadas durante el recorrido. Para el cálculo, se establece la emisión de kg de CO<sub>2</sub> por cada kg de gasolina C<sub>8</sub>H<sub>18</sub>, para una combustión en razón de equivalencia estequiométrica, así:

$$\text{Emisiones de CO}_2 = \frac{352 \frac{\text{kgCO}_2}{\text{kmol}}}{114 \frac{\text{kgC}_8\text{H}_{18}}{\text{kmol}}} = 3,087 \frac{\text{kgCO}_2}{\text{kgC}_8\text{H}_{18}}$$

Siendo la densidad promedio del combustible, durante pruebas se tiene que:

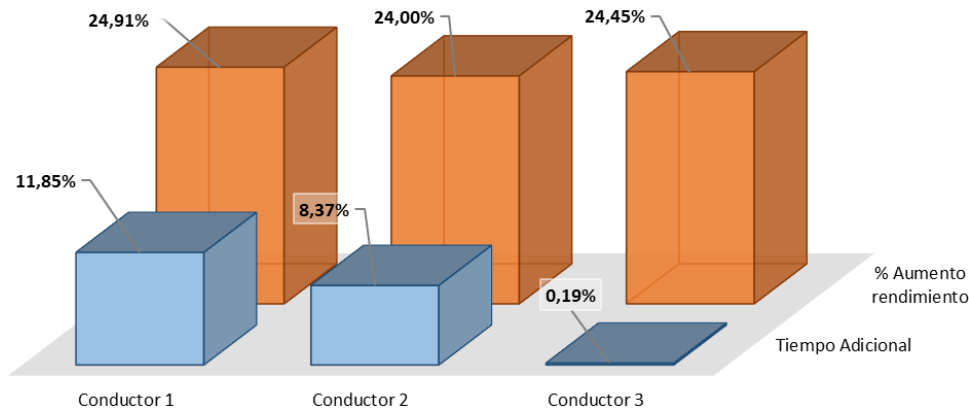
$$\text{Emisiones de CO}_2 = \left(3,087 \frac{\text{kgCO}_2}{\text{kgC}_8\text{H}_{18}}\right) \left(735,6 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) \left(\frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ l}}\right) = 2,269 \text{ kgCO}_2/\text{l}$$

La Tabla 23 presenta el análisis comparativo de las emisiones producidas en todas las pruebas con y sin estrategia de eficiencia energética, así como el porcentaje de reducción teórico de las emisiones.

**Tabla 23.** Análisis de emisiones en la implementación de conducción eficiente.

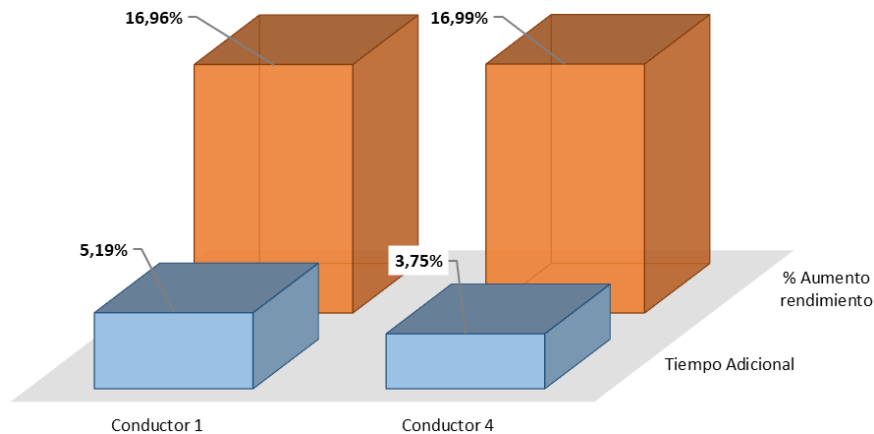
	Volumen de combustible consumido [l]	Emisiones kg CO <sub>2</sub>
<b>Sin conducción eficiente</b>	41,64	94,48
<b>En Conducción eficiente</b>	34,37	77,98
<b>Diferencia [%]</b>	21,1	

Por último, se encontró que en la realización de ensayos de conducción eficiente existe un aumento promedio de 6,8% en el tiempo de ejecución de pruebas en horas valle. En la Figura 28, se puede observar el porcentaje de aumento del rendimiento de combustible y el contraste con el porcentaje de tiempo adicional invertido en la realización de las pruebas.



**Figura 28.** Comparación de resultados y tiempo de ejecución en horas valle.

Igualmente, durante las pruebas ejecutadas en las horas pico, se observó un aumento promedio de 4,47% en el tiempo de ejecución de las pruebas. La Figura 29, presenta la comparación de los resultados en el aumento del rendimiento entre los conductores y el tiempo adicional obtenido.



**Figura 29.** Comparación de resultados y tiempo de ejecución en horas pico.

Se puede determinar que aun cuando se debe adicionar un tiempo para realizar conducción eficiente, este es mínimo en comparación con la notoria reducción del consumo de combustible, además, se evidencia que el aprovechamiento de las técnicas va directamente relacionado con la persona que las practica, tal como lo demuestra el conductor 3 en la ejecución de las pruebas en horas valle, el cual obtuvo el mismo porcentaje de aumento del rendimiento sin inversión de tiempo adicional. Además, los ensayos realizados indican que el efecto del tráfico en horas pico es relevante al implementar conducción eficiente, puesto que se presenta un 7,48% de reducción del rendimiento del combustible en comparación con los ensayos realizados en horas valle.

## **5. CONCLUSIONES**

A continuación, se presentan las conclusiones encontradas en la ejecución del proyecto:

- Se identificó que la eficiencia energética en el sector transporte por carretera procura reducir el consumo de energéticos y las emisiones de los vehículos mediante la implementación de estrategias tecnológicas y operacionales. En este sentido, con base en la revisión bibliográfica se identificaron aquellas estrategias que han sido implementadas y evaluadas en vehículos livianos y se encontraron los rangos que de reducción del consumo de combustible que se pueden obtener por cada una de ellas.
- Se revisaron y analizaron las normas técnicas de ensayo existentes a nivel mundial para la medición del consumo de combustible en vehículos livianos, obteniéndose que la normativa de los Estados Unidos es la más representativa para su implementación en Colombia, debido a que el mercado automotor nacional es dominado por vehículos provenientes de países que utilizan esta normativa como su protocolo de pruebas de etiquetado energético u homologación. Además, la Comisión Panamericana de Normas Técnicas - COPANT hace referencia a esta normativa para efectuar dichos ensayos.
- Se definieron las especificaciones técnicas de los equipos, y el protocolo de pruebas para llevar a cabo la implementación de la medición del consumo de combustible bajo el método gravimétrico, tomando en consideración que las capacidades tecnológicas y de infraestructura de los laboratorios en Colombia favorecen su implementación. Adicionalmente, se establecieron los criterios de aseguramiento metrológico necesarios para garantizar la repetibilidad y confiabilidad en los resultados en la realización de pruebas de laboratorio y ruta.
- Se identificó la variable rendimiento como mensurando del proceso de medición, se determinaron las variables involucradas en la determinación del rendimiento de combustible y se definió el modelo de estimación de la incertidumbre de los procesos de medición en laboratorio y ruta, con apoyo del Instituto Nacional de Metrología.
- Se identificó la conducción eficiente como una de las estrategias de eficiencia energética que efectivamente reduce el consumo de combustible y podría llegar a ser viable para

implementar en el territorio colombiano. Además, su costo-beneficio es bajo, permite la reducción la tasa de accidentalidad y las emisiones de CO<sub>2</sub>, adicionalmente es una estrategia cómoda para aplicar, entender y con amplios canales de información.

- Con el fin de evaluar la conducción eficiente, se realizaron pruebas de consumo específico, par torsor y potencia en un vehículo liviano con características representativas para el parque automotor colombiano (automóvil marca Chevrolet con motor 1600 cc), encontrando que se debe realizar los cambios de marcha a 2500 RPM para provechar su torque máximo y conducir a revoluciones entre 2000 RPM y 2500 RPM para obtener un bajo consumo de combustible.
- Se realizaron pruebas de consumo de combustible en laboratorio con 2 conductores experimentados siguiendo los requerimientos de las normas internacionales para la implementación de las marchas en el ciclo FTP-75, se analizaron los parámetros de operación del ciclo mediante el OBDII y se efectuó la capacitación de conducción eficiente. Realizando nuevas pruebas se evaluó la implementación de marchas altas y revoluciones bajas como estrategia de conducción eficiente en laboratorio bajo el ciclo FTP-75. Identificando una posible reducción del 15 % en el consumo de combustible respecto al valor promedio.
- Se realizaron pruebas de consumo de combustible en ruta, identificando aquella que sea representativa para el parque automotor de Pereira, con base en el ciclo de conducción desarrollado para el área metropolitana. Seguido a esto, se implementó la conducción eficiente capacitando al personal en buenas prácticas de conducción y guiando al conductor se realizaron las pruebas de consumo de combustible. Los ensayos de consumo de combustible se efectuaron con el apoyo de cuatro conductores, en horas pico y horas valle de manera aleatoria, con el fin de incluir las variables que influyen en el consumo de combustible como la infraestructura vial y el tráfico. De esta forma permitir la transparencia de los resultados de reducción del consumo de combustible.
- Se determina que la implementación de la conducción eficiente como estrategia de eficiencia energética en vehículos livianos es viable para el parque automotor y garantiza una reducción en el consumo de combustible. Identificando que, para las pruebas realizadas bajo las características de operación de los vehículos en Pereira, se puede



obtener una reducción general de hasta un 21 % en el consumo y en las emisiones de CO<sub>2</sub>, considerando una combustión en razón de equivalencia estequiométrica. Adicionalmente, crea conciencia en la movilidad, reduce la contaminación auditiva y genera un beneficio en los costos asociados al transporte hasta en recorridos cortos, logrando ahorros de hasta 11 millones de pesos para una vida útil de 15 años.

- Se encontró que en la realización de ensayos de conducción eficiente existe un aumento promedio de 4,47% y 6,8% en el tiempo de ejecución de las pruebas para horas pico y horas valle respectivamente. Sin embargo, aun cuando se debe adicionar un tiempo para realizar conducción eficiente, este es mínimo en comparación con el notorio aumento del rendimiento de combustible, además, se evidencia que el aprovechamiento de las prácticas va directamente relacionado con la persona que las ejecuta.
- Por último, puesto que el sector transporte en Colombia presenta la necesidad de la definición de una metodología que permita la medición del consumo de combustible, con el fin de determinar el impacto de la implementación de estrategias de eficiencia energética y validar los ensayos de homologación y etiquetado de vehículos de importación. Se considera que el presente trabajo es una fuente que aportará en la regulación y normativa colombiana frente a ello, con resultados metrológicamente confiables considerando las capacidades técnicas y tecnológicas de los laboratorios en Colombia. Adicionalmente, impacta positivamente sobre la búsqueda de la reducción del consumo de combustible y las emisiones vehiculares, lo cual aporta a las metas planteadas en los pactos gubernamentales.

## RECOMENDACIONES

A continuación, se presentan algunas recomendaciones encontradas durante el desarrollo del presente proyecto que podrían ser de utilidad para futuros trabajos:

- Las pruebas de medición de consumo de combustible en ruta y laboratorio se realizaron con base en el método gravimétrico, es importante identificar la diferencia que se presenta al emplear otros métodos de medición, identificando sus variables de medición y realizando un respectivo aseguramiento metrológico.
- Para obtener resultados más representativos para el parque automotor pereirano, en cuanto a la implementación de la conducción eficiente es necesario, realizar pruebas con una muestra más grande tanto en el número de conductores como en la cantidad de vehículos.
- Se debe implementar un programa de capacitación que incorpore los temas teóricos y prácticos de conducción eficiente, así como los procedimientos adecuados para seguir un plan de mantenimiento preventivo, tanto para los vehículos livianos y pesados de pasajeros por carretera como para aquellos que transportan carga.
- Realizar una divulgación social de los resultados obtenidos, con apoyo de las entidades gubernamentales que lideran y regulan el sector transporte, con el fin de aportar en la reducción del consumo de combustibles provenientes de fuentes fósiles e impulsar a que otras instituciones apoyen las futuras investigaciones en el tema.
- Por último, siendo la metodología para la medición del consumo de combustible bajo ciclos de conducción el punto de partida para un posible etiquetado energético en vehículos es indispensable seguir trabajando en el tema, con el fin de conseguir los recursos tanto tecnológicos como de infraestructura requeridos para ello.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Icontec International, "Norma Técnica Colombiana - NTC ISO 50001," no. 571. 2011.
- [2] L. Michaelis and O. Davidson, "GHG mitigation in the transport sector," *Energy Policy*, vol. 24, no. 10–11, pp. 969–984, Oct. 1996.
- [3] G. R. Timilsina and A. Shrestha, "Transport sector CO2 emissions growth in Asia: Underlying factors and policy options," *Energy Policy*, vol. 37, no. 11, pp. 4523–4539, Nov. 2009.
- [4] CTS Embarq México, "Documento base para la elaboración de la "Estrategia de Transición para promover el uso de Tecnologías y Combustibles mas limpios" en el tema de ahorro de energía en transporte." 2015.
- [5] Agencia Chilena de Eficiencia Energética, "Guía de Conducción Eficiente Vehículos particulares." 2013.
- [6] J. B. Mariano and Superintendencia de Planificación y Investigación, "Eficiencia Energética en Brasil," 2012.
- [7] C. Gavilán Labra and Agencia Chilena de Eficiencia Energética, "Etiquetado vehicular en Chile y otras medidas de eficiencia energética para vehículos particulares," 2013.
- [8] U.S. Department of Energy - Energy Efficiency and Renewable Energy, "Learn More About the Fuel Economy Label for Gasoline Vehicles." [Online]. Available: <https://www.fueleconomy.gov/feg/label/learn-more-gasoline-label.shtml>. [Accessed: 26-Dec-2016].
- [9] M. Andrejić, N. Bojović, and M. Kilibarda, "A framework for measuring transport efficiency in distribution centers," *Transp. Policy*, vol. 45, pp. 99–106, Jan. 2016.
- [10] J. Wu, Q. Zhu, J. Chu, H. Liu, and L. Liang, "Measuring energy and environmental efficiency of transportation systems in China based on a parallel DEA approach," *Transp. Res. Part D Transp. Environ.*, Sep. 2015.
- [11] Á. I. Cadena, O. V. González, O. Báez, and Unidad de Planeacion Minero Energética, "Eficiencia Energética En Colombia Estrategias y metas," 2014.
- [12] R. K. Bose and V. Srinivasachary, "Policies to reduce energy use and environmental emissions in the transport sector," *Energy Policy*, vol. 25, no. 14–15, pp. 1137–1150, Dec. 1997.
- [13] H. C. Ong, T. M. I. Mahlia, and H. H. Masjuki, "A review on energy pattern and policy for transportation sector in Malaysia," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 1, pp. 532–542, Jan. 2012.
- [14] A. Irani and A. Chalak, "Harnessing motorists' potential demand for hybrid-electric vehicles in Lebanon: Policy options, CO2 emissions reduction and welfare gains," *Transp. Policy*, vol. 42, pp. 144–155, Aug. 2015.

- [15] J. Pongthanaisawan and C. Sorapipatana, "Greenhouse gas emissions from Thailand's transport sector: Trends and mitigation options," *Appl. Energy*, vol. 101, pp. 288–298, Jan. 2013.
- [16] F. B. Chaaban, I. Nuwayhid, and S. Djoundourian, "A study of social and economic implications of mobile sources on air quality in Lebanon," *Transp. Res. Part D Transp. Environ.*, vol. 6, no. 5, pp. 347–355, Sep. 2001.
- [17] A. Singh, S. Gangopadhyay, P. K. Nanda, S. Bhattacharya, C. Sharma, and C. Bhan, "Trends of greenhouse gas emissions from the road transport sector in India," *Sci. Total Environ.*, vol. 390, no. 1, pp. 124–31, Feb. 2008.
- [18] T. Karthikeya Sharma, G. Amba Prasad Rao, and K. Madhu Murthy, "Effective reduction of NOx emissions of a HCCI (Homogeneous charge compression ignition) engine by enhanced rate of heat transfer under varying conditions of operation," *Energy*, vol. 93, pp. 2102–2115, Dec. 2015.
- [19] J. P. Ribau, C. M. Silva, and J. M. C. Sousa, "Efficiency, cost and life cycle CO2 optimization of fuel cell hybrid and plug-in hybrid urban buses," *Appl. Energy*, vol. 129, pp. 320–335, Sep. 2014.
- [20] Unidad de Planeación Minero Energética, "EFICIENCIA ENERGÉTICA Y TRANSPORTE EN COLOMBIA," 2015.
- [21] I. F. Okafor, G. O. Unachukwu, and A. O. Odukwe, "Measuring energy efficiency of the public passenger road transport vehicles in Nigeria," *Transp. Policy*, vol. 35, pp. 319–325, 2014.
- [22] Ministerio de Minas y Energía de Colombia and Unidad de Planeación Minero Energética - UPME, "Plan De Acción Indicativo De Eficiencia Energética 2017 - 2022," p. 157, 2017.
- [23] T. M. I. Mahlia, S. Tohno, and T. Tezuka, "A review on fuel economy test procedure for automobiles: Implementation possibilities in Malaysia and lessons for other countries," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 6, pp. 4029–4046, 2012.
- [24] V. Ş. Ediger and Ü. Çamdali, "Energy and exergy efficiencies in Turkish transportation sector, 1988-2004," *Energy Policy*, vol. 35, no. 2, pp. 1238–1244, 2007.
- [25] G. Fontaras and Z. Samaras, "On the way to 130 g CO2/km-Estimating the future characteristics of the average European passenger car," *Energy Policy*, vol. 38, no. 4, pp. 1826–1833, 2010.
- [26] R. Improvements, *Making Cars More Fuel Efficient: Technology for real improvements on the road*, vol. 9789282103. 2005.
- [27] G. Fontaras, N.-G. Zacharof, and B. Ciuffo, "Fuel consumption and CO2 emissions from passenger cars in Europe – Laboratory versus real-world emissions," *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 60, pp. 97–131, 2017.
- [28] A. Dimaratos, D. Tsokolis, G. Fontaras, S. Tsiakmakis, B. Ciuffo, and Z. Samaras, "Comparative Evaluation of the Effect of Various Technologies on Light-duty Vehicle

- CO2 Emissions over NEDC and WLTP," *Transp. Res. Procedia*, vol. 14, pp. 3169–3178, 2016.
- [29] H. Kato, R. Ando, Y. Kondo, T. Suzuki, K. Matsushashi, and S. Kobayashi, "Comparative measurements of the eco - driving effect between electric and internal combustion engine vehicles," *EVS27 Int. Batter. Hybrid Fuel Cell Electr. Veh. Symp.*, pp. 1–5, 2013.
- [30] M. Sivak and B. Schoettle, "Eco-driving: Strategic, tactical, and operational decisions of the driver that influence vehicle fuel economy," *Transp. Policy*, vol. 22, pp. 96–99, 2012.
- [31] M. K. Nasir, R. Md Noor, M. A. Kalam, and B. M. Masum, "Reduction of fuel consumption and exhaust pollutant using intelligent transport systems," *Sci. World J.*, vol. 2014, 2014.
- [32] G. Ombach and J. Junak, "Weight and efficiency optimization of auxiliary drives used in automobile," *19th Int. Conf. Electr. Mach. ICEM 2010*, 2010.
- [33] S. Kobayashi, S. Plotkin, and S. K. Ribeiro, "Energy efficiency technologies for road vehicles," *Energy Effic.*, vol. 2, no. 2, pp. 125–137, 2009.
- [34] HM Treasury, *The King Review of low-carbon cars - Part I: the potential for CO2 reduction*, no. November. 2007.
- [35] J. Pandazis and A. Winder, "Study of Intelligent Transport Systems for reducing CO2 emissions for passenger cars," *Eur. Road Transp. Telemat. Implement. Coord. Organ.*, vol. 1, no. 9, p. 49, 2015.
- [36] S. D. I. De Motores, A. Martin, A. Sardiña, P. Ing, M. Juan, and I. A. Juan, "UTN-FRLP Alimentación de Motores de combustión Interna," 2017.
- [37] U.S.Department of Energy - Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, "Energy Efficient Technologies." [Online]. Available: [https://www.fueleconomy.gov/feg/tech\\_adv.shtml](https://www.fueleconomy.gov/feg/tech_adv.shtml). [Accessed: 20-Jan-2018].
- [38] L. Vehicles, E. Systems, and P. Sciences, *Cost, Effectiveness, and Deployment of Fuel Economy Technologies for Light-Duty Vehicles*. 2015.
- [39] E. Álvarez Pelegry and J. Menéndez Sánchez, "Energías alternativas para el transporte de pasajeros," 2017.
- [40] Consejería de Economía y Hacienda Comunidad de Madrid, *Guía de la Eficiencia Energética en la Movilidad y el Transporte Urbano*. 2014.
- [41] Y. Xu, H. Li, H. Liu, M. O. Rodgers, and R. L. Guensler, "Eco-driving for transit: An effective strategy to conserve fuel and emissions," *Appl. Energy*, vol. 194, pp. 784–797, May 2017.
- [42] Agencia Valenciana de Energía and IDAE - Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, "Manual de conducción eficiente para vehículos turismo."

- [43] Y. Huang, E. C. Y. Ng, J. L. Zhou, N. C. Surawski, E. F. C. Chan, and G. Hong, "Eco-driving technology for sustainable road transport: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 93, no. April, pp. 596–609, 2018.
- [44] H. Wang, L. Fu, Y. Zhou, and H. Li, "Modelling of the fuel consumption for passenger cars regarding driving characteristics," *Transp. Res. Part D Transp. Environ.*, vol. 13, no. 7, pp. 479–482, 2008.
- [45] J. Wang and H. A. Rakha, "Fuel consumption model for conventional diesel buses," *Appl. Energy*, vol. 170, pp. 394–402, 2016.
- [46] F. Mensing, E. Bideaux, R. Trigui, and H. Tattegrain, "Trajectory optimization for eco-driving taking into account traffic constraints," *Transp. Res. Part D Transp. Environ.*, vol. 18, no. 1, pp. 55–61, 2013.
- [47] S. Birrell, J. Taylor, A. McGordon, J. Son, and P. Jennings, "Analysis of three independent real-world driving studies: A data driven and expert analysis approach to determining parameters affecting fuel economy," *Transp. Res. Part D Transp. Environ.*, vol. 33, pp. 74–86, 2014.
- [48] H. Ma, H. Xie, D. Huang, and S. Xiong, "Effects of driving style on the fuel consumption of city buses under different road conditions and vehicle masses," *Transp. Res. Part D Transp. Environ.*, vol. 41, pp. 205–216, 2015.
- [49] A. Sanguinetti, K. Kurani, and J. Davies, "The many reasons your mileage may vary: Toward a unifying typology of eco-driving behaviors," *Transp. Res. Part D Transp. Environ.*, vol. 52, pp. 73–84, 2017.
- [50] IDAE - Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía and Ministerio de Industria Turismo Comercio, "Eficiencia en el Transporte: Manual de conducción Eficiente," 2006.
- [51] M. S. Alam and A. McNabola, "A critical review and assessment of Eco-Driving policy & technology: Benefits & limitations," *Transp. Policy*, vol. 35, pp. 42–49, 2014.
- [52] W. Zeng, T. Miwa, and T. Morikawa, "Prediction of vehicle CO<sub>2</sub>emission and its application to eco-routing navigation," *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, vol. 68, pp. 194–214, 2016.
- [53] G. Helfand *et al.*, "Searching for hidden costs: A technology-based approach to the energy efficiency gap in light-duty vehicles," *Energy Policy*, vol. 98, pp. 590–606, 2016.
- [54] R. A. Simmons, G. M. Shaver, W. E. Tyner, and S. V. Garimella, "A benefit-cost assessment of new vehicle technologies and fuel economy in the U.S. market," *Appl. Energy*, vol. 157, pp. 940–952, 2015.
- [55] S. Skippon, S. Veeraraghavan, H. Ma, P. Gadd, and N. Tait, "Combining technology development and behaviour change to meet CO<sub>2</sub> cumulative emission budgets for road transport: Case studies for the USA and Europe," *Transp. Res. Part A Policy Pract.*, vol. 46, no. 9, pp. 1405–1423, 2012.

- [56] I. Jeffreys, G. Graves, and M. Roth, "Evaluation of eco-driving training for vehicle fuel use and emission reduction: A case study in Australia," *Transp. Res. Part D Transp. Environ.*, 2016.
- [57] S. H. Ho, Y. D. Wong, and V. W. C. Chang, "What can eco-driving do for sustainable road transport? Perspectives from a city (Singapore) eco-driving programme," *Sustain. Cities Soc.*, vol. 14, no. 1, pp. 82–88, 2015.
- [58] E. Jonkers, J. Nellthorp, I. Wilmink, and J. Olstam, "Evaluation of eco-driving systems: A European analysis with scenarios and micro simulation," *Case Stud. Transp. Policy*, no. June 2017, pp. 0–1, 2018.
- [59] DieselNet, "Emission Test Cycles," *ECE 15 + EUDC / NEDC*, 2013. [Online]. Available: [https://dieselnet.com/standards/cycles/ece\\_eudc.php](https://dieselnet.com/standards/cycles/ece_eudc.php). [Accessed: 10-Jul-2017].
- [60] Asociación Colombiana de Vehículos Automotores - ANDEMOS, "Sector Automotor Informe Vehículos Diciembre Visión general del sector 2016." 2016.
- [61] Asociación Colombiana de Vehículos Automotores - ANDEMOS, "Sector Automotor Informe Vehículos Junio Visión general del sector 2017." 2016.
- [62] Grupo De Estudios Económicos, "Estudios de Mercado," *Estudio del Sector Automotor en Colombia*, vol. 1, no. 1. pp. 1–106, 2012.
- [63] Aktiva Servicios Financieros, "Estudios Sectoriales: La Industria Automotriz en Colombia 2015." pp. 1–5, 2015.
- [64] DELPHI, "Worldwide Emissions Standards: Passenger Cars and Light Duty." 2017.
- [65] A. P. Mock, J. Kühlwein, U. Tietge, V. Franco, A. Bandivadekar, and J. German, "The WLTP: How a new test procedure for cars will affect fuel consumption values in the EU," 2014.
- [66] K. Blumberg and F. Posada, "Comparison of US and EU programs to control light-duty vehicle emissions," 2015.
- [67] J. German and P. Mock, "The future of vehicle emissions testing and compliance," *Icct*, no. November, 2015.
- [68] H. Steven, "Homologation test cycles worldwide - Status of the WLTP," *Green Glob. NCAP Label. / green scoring Work.*, pp. 1–35, 2013.
- [69] The International Council on Clean Transportation, "Which vehicle emissions test cycle is most demanding? | International Council on Clean Transportation." [Online]. Available: <http://www.theicct.org/blogs/staff/which-vehicle-emissions-test-cycle-most-demanding>. [Accessed: 17-Jul-2017].
- [70] M. Tutuianu *et al.*, "Development of the World-wide harmonized Light duty Test Cycle (WLTC) and a possible pathway for its introduction in the European legislation," *Transp. Res. Part D Transp. Environ.*, vol. 40, pp. 61–75, 2015.
- [71] ICCT, "From laboratory to road: A 2015 update of official and 'real-world' fuel

- consumption and CO2 values for passenger cars in Europe," no. sept, p. 77, 2015.
- [72] M. Nesbit *et al.*, "Comparative Study on the differences between the EU and US legislation on emissions in the automotive sector," *Eur. Parliam. Com.*, 2016.
  - [73] Associacao Brasileira de NormasTécnicas, "ABNT NBR 7024 - Veículos rodoviários automotores leves - Medicao do consumo de combustivel - Método de ensaio." pp. 1–8, 2010.
  - [74] Organismos Nacionales de Normalización (ONN) de las Américas, "COPANT - Comisión Panamericana de Normas Técnicas." [Online]. Available: <http://www.copant.org/index.php/es/>. [Accessed: 18-Jul-2017].
  - [75] U.S. Government Publishing Office, "CFR 40 — Code of Federal Regulations." [Online]. Available: [https://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?tpl=/ecfrbrowse/Title40/40tab\\_02.tpl](https://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?tpl=/ecfrbrowse/Title40/40tab_02.tpl). [Accessed: 18-Jul-2017].
  - [76] ABNT, "NBR 10312 - Veículos rodoviários automotores leves - Determinação da resistência ao deslocamento por desaceleração livre em pista de rolamento e simulação em dinamômetro," 2014.
  - [77] M. Kisan, S. Sangathan, J. Nehru, and S. G. Pitroda, "Automotive Vehicles - Determination of Road-Load Constants by coast Down Test Method," 2000.
  - [78] Associacao Brasileira de Normas Técnicas, "ABNT NBR 6601 - Veículos rodoviários automotores leves — Determinação de hidrocarbonetos, monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio, dióxido de carbono e material particulado no gás de escapamento." 2005.
  - [79] S. de T. Michelin and Clermont-Ferrand, "The tyre The tyre Rolling resistance," 2003.
  - [80] J. Hipp, C. Hill, and M. Hall, "Evaluación de datos de medición Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida," *Test*, pp. 309–326, 2007.
  - [81] Ministerio de Transporte, "Transporte en cifras - Estadísticas 2014," p. 73, 2014.
  - [82] Joint Committee for Guides in Metrology, "Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement," Sèvres, 2008.
  - [83] United States Department of Energy and Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, "Used Car Fuel Economy Label." [Online]. Available: <https://www.fueleconomy.gov/feg/UsedCarLabel.jsp>. [Accessed: 30-Jul-2018].
  - [84] Senter Novem and IDAE - Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, "La Conducción Eficiente."
  - [85] A. Hurtado Gómez, "'Desarrollo de ciclos de conduccion para el área metropolitana centro occidente – Amco,'" 2014.
  - [86] S. Sandoval, "Guía Técnica: Validación de métodos y determinación de la incertidumbre de la medición," *Zhurnal Eksp. i Teor. Fiz.*, p. 66, 2010.



- [87] International Energy Agency (IEA), "Technology Roadmap: Fuel Economy of Road Vehicles," 2012. [Online]. Available: [http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Fuel\\_Economy\\_2012\\_WEB.pdf](http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Fuel_Economy_2012_WEB.pdf).
- [88] A. E. Atabani, I. A. Badruddin, S. Mekhilef, and A. S. Silitonga, "A review on global fuel economy standards, labels and technologies in the transportation sector," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 9, pp. 4586–4610, Dec. 2011.
- [89] J. H. Arango, "Calidad de los combustibles en Colombia," *Rev. Ing. Univ. los Andes*, no. 29, pp. 100–108, 2009.
- [90] Y. a. Cengel and M. E. Boles, *Termodinamica - Séptima edición*. 2011.
- [91] United States Enviromental Protection Agency - EPA, "About Diesel Fuels," 2017. [Online]. Available: <https://www.epa.gov/diesel-fuel-standards/about-diesel-fuels>. [Accessed: 26-Apr-2017].
- [92] M. del medio Ambiente, "Estudio de Consultoria en Gas Natural Vehicular," no. 079, 2001.
- [93] F. de M. L. Valdeiglesias López, "Estudio de Factibilidad Económica para la Conversión de Vehículos Gasolineros a gas Licuado de Petróleo," *Universidad Nacional de Ingeniería. Programa Cybertesis PERÚ*. 2007.
- [94] Observatorio Tecnológico de la Energía - IDAE and Ministerio de Industria Energía y Turismo, "Mapa Tecnológico movilidad eléctrica." 2012.
- [95] United States Department of Energy, "Alternative Fuels Data Center: Hydrogen Basics," *Energy Efficiency & Renewable Energy*. [Online]. Available: [http://www.afdc.energy.gov/fuels/hydrogen\\_basics.html](http://www.afdc.energy.gov/fuels/hydrogen_basics.html). [Accessed: 27-Apr-2017].



## APÉNDICE

### 1. Rendimiento o consumo de combustible

El rendimiento de combustible es un indicativo del consumo o economía de un vehículo, donde se relaciona la distancia recorrida por la cantidad de energía requerida. Los términos economía, eficiencia e intensidad de combustible son intercambiables y su valor es uno de los factores de desempeño vehicular más estudiados en el mundo. Los términos consumo y rendimiento de combustible son recíprocos. Generalmente, el rendimiento de combustible se expresa relacionando la cantidad de kilómetros recorridos por volumen de combustible consumido expresado en [km/l], y el consumo de combustible se expresa en [l/100 km] [87].

### 2. Etiquetado de vehículos

Las etiquetas de consumo de combustible pueden desempeñar un papel importante en las decisiones de compra de vehículos, puesto que se puede comparar vehículos respecto a sus rangos de eficiencia. Los gobiernos han estado pidiendo a los fabricantes introducir sistemas de etiquetado con el fin de dar lugar a un ahorro de combustible.

Una etiqueta para los nuevos vehículos de pasajeros, con el objetivo de informar a los consumidores acerca de la economía de combustible de los diferentes vehículos de pasajeros, debe ser [88]:

- Simple y de fácil comprensión para los compradores.
- Insensible a la manipulación: no debería ser posible cambiar la clasificación de un modelo mediante una simple manipulación por parte del fabricante.
- Durable: con el fin de asegurarse de que los vehículos actuales, así como futuros se clasifiquen correctamente.
- Realizable: los datos de consumo de combustible estandarizados deben basarse en las características del vehículo disponibles, tales como la masa, dimensiones externas, la potencia específica del motor o capacidad de carga específica.
- Visible y bien conocida: con el fin de lograr la atención del comprador.
- Ajustable a la evolución tecnológica en la economía de combustible.
- Aceptado y apoyado por los consumidores, autoridades, asociaciones de automóviles y de consumo, por la industria del automóvil y los concesionarios de automóviles.

### **3. Fuentes de energía empleadas en el sector transporte**

A través de los años, se han implementado diversas fuentes de poder, que liberan energía para ser usada en el transporte. Dichas fuentes, son los combustibles, los cuales pueden ser encontrados en la naturaleza en fase sólida (como el carbón), líquida (petróleo y algunos derivados) y gaseosa (gas natural, gas metano, etc). Actualmente, las flotas vehiculares emplean dos grandes grupos de combustibles, los fósiles (aquellos derivados del petróleo) y los renovables (como el hidrógeno y los biocombustibles). A continuación, se describe algunos de ellos:

#### **3.1. Gasolina**

La gasolina es una mezcla de hidrocarburos alifáticos usada generalmente en los motores de combustión interna. Es un derivado del petróleo, obtenido por medio de destilación fraccionada y contiene sustancias que pueden ser nocivas para la salud y contaminantes para el ambiente, tales como el benceno y el plomo. Particularmente en Colombia, desde el año 2009, se realizó un proceso de reducción de los impactos negativos de la gasolina, buscando también mejorar su potencial energético. Para ello, se exigió la eliminación del plomo, la reducción de los aromáticos y se reguló una adición de etanol del 10%. Además, en el 2010 se proyectó una reducción del contenido de azufre de 900 ppm a menos de 300 ppm [89].

#### **3.2. Diésel**

El diésel, también conocido como ACPM, gasóleo o gasoil, es un hidrocarburo líquido compuesto fundamentalmente por parafinas y empleado como fuente de energía principalmente en camiones, tractocamiones, locomotoras, embarcaciones, etc., los cuales en su mayoría se usan en el transporte de carga y mercancías. Esto se debe a que estas máquinas de combustión interna queman el combustible de manera más completa y operan con relaciones de compresión mucho más altas en comparación con las gasolinas, lo cual las hace más eficientes. Así, la mayor eficiencia y el menor costo de combustible de los motores diésel los convierte en la opción más indicada para aplicaciones que requieren grandes cantidades de potencia [90]. La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), realiza una regulación del combustible diésel, ya que las emisiones resultantes de su combustión, contribuyen a la contaminación del aire, afectando el ambiente y la salud humana [91].

### **3.4. Gas natural vehicular**

El término “gas natural” se utiliza para referirse al gas proveniente del subsuelo que se extrae durante la explotación del petróleo. Generalmente, es una mezcla de gases compuesta principalmente por metano ( $\text{CH}_4$ , en una proporción entre el 98 y el 59%), uno de los hidrocarburos más ligeros y más simples; las porciones restantes están constituidas por nitrógeno, dióxido de carbono, propano, etano, sulfuro de hidrógeno, agua y otros elementos. El gas natural vehicular (GNV) se adapta muy bien a los motores de ciclo Otto (encendido por chispa), presenta buena resistencia a la detonación, se mezcla en forma homogénea con el aire y presenta una combustión más completa, libre de hollín y con menos producción de contaminantes como el monóxido de carbono (CO), hidrocarburos (HC) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). Típicamente, el gas natural comprimido a 2400 psia y 70°F, presenta un poder calorífico de 19760 BTU/m<sup>3</sup> [92].

### **3.5. Gas licuado de petróleo**

El Gas Licuado de Petróleo (GLP), más conocido como gas propano, gas en cilindro o pipetas, es una mezcla de hidrocarburos livianos conformados por butano y propano. Se encuentra en estado gaseoso a temperatura y presión ambiente y se licúa bajo condiciones moderadas de presión, pero regresa fácilmente a condición gaseosa cuando se libera, permitiendo su transporte en forma menos voluminosa como líquido y ser utilizado posteriormente como fase gaseosa. El uso del GLP en los vehículos que funcionaban con combustibles (gasolinas) surgió como una posible respuesta a las necesidades de reducción de emisiones contaminantes y al costo de mantenimiento del sector que existen a nivel mundial, buscando un funcionamiento más seguro de los vehículos, con parámetros similares a los de operación original y modificando el motor lo menos posible [93].

### **3.6. Electricidad**

El uso de la electricidad en el transporte está encaminado a reemplazar parcial o totalmente la participación de los combustibles fósiles como fuente de energía, buscando mitigar el impacto ambiental asociado a los GEI generados en los motores de combustión interna. Los automotores que son propulsados, en parte o en su totalidad, por energía eléctrica son llamados vehículos eléctricos, los cuales están compuestos principalmente por los siguientes componentes: una batería para el almacenamiento de energía, un motor eléctrico de propulsión, un generador, una transmisión mecánica y un sistema de control [94].

### 3.7. Hidrógeno

El hidrógeno al ser una fuente renovable, abundante (presente en muchos compuestos de la naturaleza) y no contaminante, lo ha convertido en un combustible ideal para remplazar el uso de combustibles fósiles en los motores de combustión interna, puesto que el único producto de la combustión del hidrógeno con el oxígeno es el vapor de agua. El hidrógeno está contenido en enormes cantidades de agua, hidrocarburos (como el metano) y otras materias orgánicas, pero debe ser separado de estos componentes de una manera eficiente. Posterior a su separación, este elemento puede ser aprovechado mediante la combustión, para generar potencia mecánica; o por medio de una pila o celda de combustible para producir energía eléctrica mediante un proceso electroquímico [95].

### 4. Clasificación de vehículos

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos – EPA y la Comisión Europea de las Naciones Unidas realiza una clasificación de vehículos para realizar ciclos de prueba y determinar límites de emisiones de gases producidos en la combustión. Estas clasificaciones tienen en cuenta el peso del vehículo, la capacidad de pasajeros y el uso. A continuación, en las Tabla 24 y

Tabla 25, se describe la clasificación de los vehículos realizando un énfasis en los vehículos livianos.

**Tabla 24.** Clasificación de vehículos Estados Unidos.

Categoría	Subcategoría		Capacidad	Peso neto [kg]	Peso Bruto [kg]	ALVW [kg]	LVW [kg]
LDV	---		≤ 12 Pasajeros	---	---	---	---
LDT	LLDT	LDT1	> 12 Pasajeros	≤ 2722	≤ 2722	---	≤ 1701
		LDT2					> 1701
	HLDT	LDT3			> 2722	≤ 2608	---
		LDT4			> 3856	> 2608	---

ALVW: *Adjusted Loaded Vehicle Weight*. Promedio numérico del peso neto y el peso bruto vehicular.

LVW: *Loaded Vehicle Weight*. Peso neto vehicular más 136 kg.

LDV: *Light-Duty Vehicle* (Vehículo liviano).

LDT: *Light-Duty Truck* (Camioneta liviano).

HLDT: *Heavy-Light Duty Truck* (Camiones Livianos).

**Tabla 25.** Clasificación de vehículos Unión Europea.

Categoría	Subcategoría		Capacidad	Peso bruto [kg]	RW <sup>5</sup> [kg]
M	M1		≤ 8 Pasajeros	---	---
	M2		8 Pasajeros	≤ 5000	---
	M3		8 Pasajeros	5000	---
N	N1	Clase I	---	≤ 3500	1250
		Clase II	---		≥ 1250 ≤ 1700
		Clase II	---		1700
	N2		---	> 3500 ≤ 12000	---

Categoría M: En ella se incluyen los vehículos motorizados de al menos cuatro ruedas destinados al transporte de pasajeros.

Categoría N: Estos vehículos a motor están diseñados para el transporte de mercancías. Se agrupan por tamaños, e incluyen camiones y camioneta

# ANEXO

## 1



## **ANEXO 1**

### **1. Metodología para la medición de consumo de combustible en vehículos livianos**

La metodología americana consiste en tres fases de desarrollo: i) Prueba de *Coast Down* en ruta, con la cual se estiman los coeficientes de resistencia a la rodadura y aerodinámica del vehículo de pruebas, ii) Prueba de *Coast Down* en laboratorio, mediante la cual se realiza una comparación de los coeficientes de resistencia obtenidos en laboratorio y en ruta, para posteriormente ajustar las curvas de desaceleración, con el fin de controlar las cargas ejercidas por el dinamómetro durante la prueba de consumo de combustible y iii) Medición del consumo de combustible incluyendo los coeficientes de resistencia al movimiento, replicando la operación real de los vehículos en condiciones controladas de laboratorio.

A continuación, se define la metodología de medición del consumo de combustible de los vehículos livianos con el método gravimétrico y sus respectivos protocolos de pruebas, tomando como base las normas de ensayo de los Estados Unidos, Brasil, la Comisión Panamericana de Normas Técnicas – COPANT.

#### **1.1. Prueba de *Coast Down***

La prueba de *Coast Down* consiste en la desaceleración de un vehículo de motor en una pista recta y plana, a partir de una velocidad inicial determinada, hasta llegar a una velocidad final establecida por la prueba, con el motor desembragado, determinando el tiempo que toma el vehículo en completar el delta de velocidades y la distancia recorrida durante la desaceleración. El ensayo permite determinar los coeficientes de resistencia a la rodadura y aerodinámica que presenta el automotor al realizar desaceleración libre en ruta. Adicionalmente, la prueba se realiza en laboratorio con la finalidad de ajustar las curvas de desaceleración y los coeficientes del vehículo, con los resultados a los obtenidos en ruta.

Los coeficientes aerodinámicos y de rodadura son introducidos en el software del dinamómetro de rodillos en complemento del ciclo de prueba FTP-75, con el fin de generar resultados de consumo de combustible más cercanos a la realidad. A continuación, se muestra el protocolo de pruebas para su implementación:

### **1.1.1. Verificación de parámetros de ensayo – *Coast Down* en ruta**

- 1.** Registrar la magnitud de la temperatura ambiente y humedad relativa.
- 2.** Verificar durante la prueba que la temperatura ambiente permanezca entre 5 °C (41°F) y 35°C (95 °F) a la sombra.
- 3.** Registrar la magnitud de la presión atmosférica.
- 4.** Verificar que la prueba se realice a una presión atmosférica entre 91 kPa y 104 kPa (680 mm Hg y 780 mm Hg).
- 5.** Registrar la magnitud de las componentes tangencial y transversal de la velocidad del viento, mediante un anemómetro de medición.
- 6.** Registrar la magnitud de temperatura de la pista.
- 7.** Verificar que la densidad del aire no presente una desviación mayor de  $\pm 7,5\%$ , respecto a las condiciones de referencia durante los ensayos.
- 8.** Realizar recorrido piloto a lo largo de la pista a una velocidad constante entre 40 km/h y 60 km/h, registrar las variaciones de nivel de la pista con un OBDII o sistema GPS.
- 9.** Verificar que la pista de prueba sea lisa, se encuentre seca, y la pendiente no exceda el 0,5% a lo largo de la pista. El desnivel del final de la pista respecto al inicio no debe exceder el 1,5%.
- 10.** Verificar que la profundidad de sus surcos de las cubiertas de las llantas se encuentre entre el 90% y el 50% del valor del neumático sin uso.
- 11.** Ajustar la presión de los neumáticos de acuerdo a las recomendaciones del fabricante o a las especificaciones de la etiqueta del neumático.
- 12.** Inspeccionar la superficie de los neumáticos y verificar que no se presenten incrustaciones que alteren la rodadura.
- 13.** Verificar que las instalaciones de los dispositivos de medición no alteren el desempeño, estabilidad y aerodinámica del vehículo, así como las condiciones de manejo del conductor.
- 14.** Antes de la realización de las pruebas, verificar la correcta operación de los equipos.

### **1.1.2. Recomendaciones previas a la ejecución del ensayo**

- 1.** Verificar el balanceo de las ruedas, la regulación de la suspensión y los frenos, así como la alineación de la dirección del vehículo.
- 2.** Verificar que las superficies del vehículo se encuentran limpias y las ventanas se encuentran cerradas antes y durante la ejecución de los ensayos.
- 3.** Desconectar o dejar inoperante el sistema de acondicionamiento de aire del vehículo y otros equipos auxiliares como sistemas de iluminación y entretenimiento.
- 4.** Realizar 20 ensayos, agrupados en 10 pares (ida y vuelta – ambos sentidos de la pista seleccionada), de las cuales se seleccionan los 5 mejores pares bajo criterio estadístico para el cálculo de los coeficientes de resistencia aerodinámica y a la rodadura.
- 5.** Si durante la prueba es necesario accionar los frenos, el ensayo debe ser interrumpido.
- 6.** La temperatura ambiente, la presión barométrica y la velocidad del viento deben ser medidas en cada desaceleración.
- 7.** Realizar la medición de la presión, la temperatura, la humedad relativa y la velocidad del viento en la mitad de la pista.
- 8.** Incluir la masa de los equipos de medición, así como la masa del personal que realiza la prueba como parte de la masa del vehículo.
- 9.** La masa de los equipos de medición y del personal deben ser de al menos 136 kg. De no alcanzarse este valor, debe añadirse un lastre.
- 10.** La pista de prueba debe ser recta, y su superficie debe ser de hormigón o asfalto en buen estado.
- 11.** Verificar que sobre la superficie de la pista no se encuentren restos de materiales punzantes y/o desperdicios que afecten la rodadura.
- 12.** La presión y la temperatura patrón requeridas para la corrección de los resultados debe ser: 101,325 kPa y 293,15 K (20 °C).
- 13.** La prueba no debe ser ejecutada si se presenta niebla que dificulte la visibilidad.
- 14.** Suspender la realización de los ensayos si se presentan velocidades del viento superiores a 3 m/s para la componente longitudinal y/o 2 m/s para la componente transversal. Las mediciones deben realizarse a una altura aproximada de 70 cm de la pista de ensayos.
- 15.** Realizar los ensayos con el tanque de combustible y demás fluidos llenos.
- 16.** Realizar la calibración de los equipos cada uno o dos años.

17. No se requiere utilizar combustible patrón para la ejecución de los ensayos.
18. Se aclara que no existe un control sobre la condición de la superficie donde se realiza la prueba.
19. Realizar el precalentamiento del vehículo por alrededor de 30 minutos.

### **1.1.3. Ejecución del ensayo de *Coast Down* en ruta**

1. Posicionar el vehículo en la línea de partida.
2. Girar el volante completamente de izquierda a derecha y de derecha a izquierda.
3. Registrar la magnitud de la temperatura ambiente y humedad relativa.
4. Registrar la magnitud de la presión atmosférica.
5. Registrar la magnitud de las componentes tangencial y transversal de la velocidad del viento.
6. Registrar la magnitud de temperatura de la pista.
7. Acelerar el vehículo manteniendo un curso recto y constante hasta alcanzar una velocidad igual o superior a 85 km/h (23,61 m/s) e iniciar la desaceleración libre del vehículo desacoplando la transmisión sin accionar el freno y evitando dejar accionado el embrague.
8. En el momento en el que el vehículo alcance una velocidad de 80 km/h (22,22 m/s) iniciar el registro de velocidad y tiempo hasta que la velocidad del vehículo llegue a 30 km/h (8,33 m/s).
9. Repetir inmediatamente el ensayo, conduciendo en dirección opuesta sin accionar el freno al girar.
10. Ejecutar los pasos 3 a 9, hasta completar diez (10) pares de registros (ida y vuelta),
11. Calcular los coeficientes de resistencia al movimiento.

Una vez ejecutado el ensayo de *Coast Down* en ruta, y de realizar el cálculo de los coeficientes de rodadura y aerodinámica ( $\mu$  y  $C_d$ ), se realiza el ensayo de *Coast Down* en laboratorio, tal como se muestra a continuación:

#### **1.1.4. Verificación de parámetros y condiciones de prueba – *Coast Down* en laboratorio**

1. Registrar la magnitud de temperatura ambiente y humedad relativa.
2. Verificar que la prueba se realice a una temperatura ambiente entre 5 °C (41°F) y 35°C (95 °F) a la sombra.
3. Registrar la magnitud de la presión atmosférica.
4. Verificar que la densidad del aire no presente una desviación mayor de  $\pm 7,5\%$  respecto a las condiciones de referencia durante los ensayos.
5. Registrar la magnitud de temperatura de los rodillos.
6. Ajustar la presión de los neumáticos de acuerdo con las recomendaciones del fabricante o como se especifica en la etiqueta del neumático.
7. Inspeccionar la superficie de los neumáticos y verificar que no presenten incrustaciones que alteren la rodadura.
8. Verificar que las instalaciones de los dispositivos de medición no alteren el desempeño y estabilidad del vehículo, así como las condiciones de ejecución de la prueba.
9. Verificar la correcta operación de los equipos.

#### **1.1.5. Recomendaciones previas generales**

1. Verificar el balanceo de las ruedas, el funcionamiento regular de la suspensión y los frenos, así como la alineación de la dirección del vehículo.
2. Desconectar o dejar inoperante el sistema de acondicionamiento de aire del vehículo y otros equipos auxiliares como sistemas de iluminación y entretenimiento.
3. Incluir la masa de los equipos de medición, así como la masa del personal que realiza la prueba como parte de la masa del vehículo.
4. El vehículo de prueba debe tener mínimo 3000 km de rodaje.
5. Realizar los ensayos con el tanque de combustible y demás los fluidos de los diferentes sistemas llenos.
6. No se requiere utilizar combustible patrón para la ejecución de los ensayos.

### **1.1.6. Ensayo de *Coast Down* en dinamómetro**

- 1.** Verificar las condiciones del vehículo.
- 2.** Ajustar la presión de neumáticos a 310 kPa para dinamómetros de doble rodillo.
- 3.** Posicionar y alinear el vehículo sobre el dinamómetro de chasis.
- 4.** Anclar el vehículo y ubicar el extractor de gases en el tubo de escape.
- 5.** Verificar la correcta operación de los sistemas del dinamómetro.
- 6.** Fijar la inercia equivalente y la potencia indicada en el dinamómetro.
- 7.** Ingresar los valores de los coeficientes de resistencia al movimiento  $C_{rr}$  y  $C_{w}$ , obtenidos en la prueba de *Coast Down* en ruta, al software de control del dinamómetro.
- 8.** Conectar los dispositivos de medición de velocidad y tiempo.
- 9.** Precalentar el vehículo accionando el dinamómetro hasta alcanzar una velocidad constante de 80 km/h, por un tiempo mínimo de 20 minutos.
- 10.** Después de los 20 minutos, desacelerar el vehículo a 0 km/h.
- 11.** Iniciar el ensayo acelerando el vehículo a una velocidad igual o superior a 105 km/h e iniciar la desaceleración libre del vehículo desacoplando la transmisión, dejando la marcha en neutro sin accionar el freno.
- 12.** Dejar desacelerar el vehículo hasta alcanzar una velocidad de 30 km/h.
- 13.** Repetir el procedimiento de desaceleración del vehículo (Pasos 11 y 12) hasta alcanzar diez (10) repeticiones.
- 14.** Realizar el proceso de cálculo de los coeficientes de restricción al movimiento en laboratorio.

Posteriormente al cálculo, se comparan las curvas de desaceleración obtenidas en ruta y con las de laboratorio, con el fin de observar si la tendencia y los resultados son similares.

En caso tal de que los resultados no sean aproximados, se deben reajustar los coeficientes de resistencia al movimiento ingresados en el software del dinamómetro, y ejecutar nuevamente el ensayo. De esta forma agregar las cargas restrictivas al movimiento como complemento del ciclo FTP-75. Este proceso debe ser reiterativo hasta obtener una desviación no mayor al 10%.

Por último, se efectúa el ensayo de consumo de combustible, tal como se muestra a continuación:

## **1.2. Medición de consumo de combustible**

La medición del consumo de combustible se realiza por el método gravimétrico, el cual consiste en medir la cantidad de masa de combustible, antes de iniciar, durante y una vez finalizada la prueba, de esta forma conociendo la distancia recorrida, se puede calcular el rendimiento del vehículo.

A continuación, se definen las operaciones previas y el protocolo para la medición y el cálculo del consumo de combustible en laboratorio.

### **1.2.1. Operaciones previas a la ejecución de la metodología de medición de consumo de combustible**

Previo a la ejecución de los ensayos, el vehículo debe permanecer a una temperatura ambiente controlada entre 20 °C y 30 °C, por un lapso mínimo de 3 horas.

- 1.** Realizar la verificación y calibración de las condiciones metrológicas de los equipos de medición (dinamómetro, balanzas, etc.).
- 2.** Ajustar la presión de aire de las llantas del vehículo al valor recomendado por el fabricante o como se especifica en la etiqueta del neumático.
- 3.** Inspeccionar la superficie de las llantas y verificar que estas no presenten incrustaciones que alteran la rodadura.
- 4.** Fijar la inercia equivalente y la potencia indicada en el dinamómetro.
- 5.** Ingresar los valores de los coeficientes de resistencia al movimiento y ajustados, obtenidos en la prueba de *Coast Down* en ruta, al software de control del equipo dinamométrico.
- 6.** Posicionar el vehículo sobre el dinamómetro con el motor apagado.
- 7.** Anclar el vehículo.
- 8.** Conectar el ducto de extracción de los gases de escape, al tubo de escape del vehículo.
- 9.** Abrir el capó del vehículo y posicionar el ventilador de refrigeración.
- 10.** Desconectar o dejar inoperante el sistema de acondicionamiento de aire del vehículo y otros equipos auxiliares como sistemas de iluminación y entretenimiento.
- 11.** Conectar el dispositivo de medición de masa de combustible.
- 12.** Verificar que la temperatura ambiente esté entre 20 °C y 30 °C, que la humedad relativa sea menor al 75%, y registrar la presión atmosférica de la prueba.

### **1.2.2. Ejecución del ensayo**

- 1.** Encender el dispositivo de medición de masa de combustible, el medidor de tiempo, y el indicador gráfico del ciclo de conducción, y proceder a encender el motor. Este momento corresponde al instante cero del ciclo de conducción.
- 2.** Engranar la 1ª marcha 15 segundos después de encender el motor.
- 3.** Comenzar la aceleración inicial del vehículo en el ciclo de manejo 20 segundos después de encender el motor.
- 4.** Operar el vehículo de acuerdo con el ciclo de conducción.
- 5.** Al final de la desaceleración, programada a los 505 segundos, registrar la masa del combustible consumido hasta ese instante, e iniciar inmediatamente la medición para la fase siguiente. Antes de la aceleración programada a los 510 segundos, registrar el número de rotaciones del rodillo y ajustar el cero del contador, o cambiarlo a un segundo contador
- 6.** Apagar el motor dos segundos después de finalizar la última desaceleración.
- 7.** Registrar la masa de combustible consumido hasta ese instante, y medir la temperatura de los rodillos, justo después de apagar el motor.
- 8.** Registrar el número de rotaciones contadas en el rodillo y ajustar el cero del contador.

### **1.2.3. Metodología para la medición de consumo de combustible en ruta**

La medición de factores humanos asociados a la conducción, no son sencillos de evaluar en pruebas de laboratorio, generalmente se busca su medición en ruta, puesto que los resultados obtenidos consideran variables como tráfico, infraestructura e imprevistos los cuales influyen directamente en el consumo de combustible, por lo tanto en vista de que existen estrategias de eficiencia energética que se deben analizar en ruta, se desarrolló un protocolo de pruebas basado en normativas internacionales.

A continuación, se presenta una metodología para el desarrollo de pruebas en ruta, basados en el método gravimétrico para la medición del consumo de combustible en vehículos livianos:



- 1.** Realizar la verificación y calibración de las condiciones metroológicas de los equipos de medición (balanzas, GPS, OBD II, etc.).
- 2.** Ajustar la presión de aire de las llantas del vehículo al valor recomendado por el fabricante o como se especifica en la etiqueta del neumático.
- 3.** Registrar la magnitud de la temperatura ambiente y humedad relativa.
- 4.** Registrar y verificar que la temperatura ambiente permanezca entre 5 °C (41°F) y 35°C (95 °F) a la sombra antes y al finalizar la prueba.
- 5.** Registrar la magnitud de la presión atmosférica antes y después de cada ensayo.
- 6.** Verificar y elegir una pista en donde sus características topográficas y de infraestructura no alteren el buen desempeño del vehículo.
- 7.** Desconectar el sistema de acondicionamiento de aire del vehículo y otros equipos auxiliares (iluminación y entretenimiento) si estos no serán evaluados en la prueba.
- 8.** Acondicionar el vehículo para el método gravimétrico en ruta; introducir una nueva línea de combustible para el motor, instalación de tanque externo, equipos de rastreo satelital, filtro de combustible, bomba y regulador de presión.
- 9.** Contabilizar los galones o litros de combustible requeridos para la prueba.
- 10.** Pesar en una balanza el tanque externo de combustible sin gasolina, con el fin de tener en cuenta su peso durante los cálculos.
- 11.** Medir la densidad del combustible antes y después de cada prueba, introducir el combustible y pesar el tanque externo antes de realizar el ensayo.
- 12.** Realizar la prueba acorde con los requerimientos (dependiendo la estrategia a evaluar),
- 13.** Pesar el tanque de combustible después de cada prueba.
- 14.** Realizar el cálculo de diferencia de masas.
- 15.** Calcular el consumo introduciendo un modelo de estimación de incertidumbre.